

POSSIBILIDADES DE UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS CORRENTES

LARA JÚLIA GUEDES DA SILVA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor Hipólito José Campos de Sousa

JULHO DE 2008

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Hipólito Sousa, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), orientador científico desta dissertação, agradeço a disponibilidade e o interesse manifestados. Exprimo igualmente, a minha gratidão pelas sugestões e pela cedência de bibliografia essencial à realização deste trabalho.

Ao Eng.º Adalberto França, da secção de Vias de Comunicação da FEUP, agradeço pela atenção e pela informação cedida.

À Eng.ª Susana Matos da empresa Sopsec, agradeço novamente pela disponibilidade e pela preocupação manifestada para a realização das visitas a algumas obras.

Ao Eng.º Duarte Almas, agradeço pela visita guiada à sua obra e pelo esclarecimento de algumas questões.

À minha colega de curso e futura engenheira, Carla Silva, agradeço pela troca de impressões e pelas sugestões dadas.

RESUMO

O conceito de desenvolvimento sustentável, cada vez mais presente no nosso quotidiano, surge com o objectivo de proteger os recursos naturais do consumo desenfreado, permitindo o usufruto dos mesmos pelas gerações vindouras. Os recursos, pedra natural e solo, estão a ser fortemente solicitados com o crescimento das populações e consequente expansão das cidades. Urge diminuir ou atenuar o consumo de inertes para construção, assim como, reduzir o volume de material com destino ao depósito em aterro, evitando a sua proliferação. Visto que, o ciclo de reposição dos recursos naturais ultrapassa em larga escala a duração de uma vida humana, compete à humanidade e particularmente aos decisores relacionados com a construção, a consciencialização para a problemática do seu esgotamento. Numa altura em que Portugal partilha dos ideais e objectivos da União Europeia em proteger os recursos naturais e reduzir a produção de resíduos, surge este trabalho na tentativa de contribuir, uma vez mais, para o estudo de possibilidades de reaproveitamento dos produtos derivados de RCD's, para outras aplicações.

O presente trabalho, baseado em casos de estudo existentes sobre a incorporação de agregados reciclados em novas amassaduras, tem como tema principal, a procura de soluções viáveis para os novos betões e para os próprios agregados.

PALAVRAS-CHAVE: Desenvolvimento sustentável, Recursos naturais, Resíduos, Agregados reciclados.

ABSTRACT

The concept of sustainable development, each time more present nowadays, appears with the goal of protecting the natural resources from the unruly consumption, allowing the usufruct of these by future generations. The resources, natural stone and soil, are being strongly solicited with the growth of populations and consequently cities' expansion. It's urgent to decrease or attenuate the consumption of inert materials for construction, together with reducing the volume of material that goes to landfilling. Attempting that, the cycle of replacement of natural resources is far superior to the duration of a human life, it competes to humanity and particularly to the construction related deciders, the awareness for their disappearance. In a time that Portugal shares the same goals than the European Union about protecting the natural resources and reducing the waste production, appears this work in the attempt of contributing, one more time, for the study of possibilities to reincorporate the CDW derived products in other applications.

The present work, based on existent case studies about the incorporation of recycled aggregates in new concretes, has as a main theme, the search for viable solutions for those and for aggregates themselves.

KEYWORDS: Sustainable development, Natural resources, Waste, Recycled aggregates.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO DA DISSERTAÇÃO	1
1.2. OBJECTIVOS DA DISSERTAÇÃO	3
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3

2. ENQUADRAMENTO DA PROBLEMÁTICA DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	5
2.1. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	5
2.1.1. INTRODUÇÃO.....	5
2.1.2. IMPORTÂNCIA DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	5
2.2. CONSTITUIÇÃO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO [4]	6
2.2.1. PERIGOSIDADE DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	8
2.3. DEMOLIÇÃO SELECTIVA [6]	9
2.4. GESTÃO DE RESÍDUOS	12
2.4.1. LEGISLAÇÃO GERAL	12
2.4.2. LEGISLAÇÃO ESPECÍFICA (DECRETO-LEI 46/2008).....	14
2.5. TRATAMENTO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	15
2.5.1. PROCESSAMENTO <i>IN SITU</i> OU EM CENTRAL	15
2.6. IMPACTES AMBIENTAIS ASSOCIADOS À PRODUÇÃO DE AGREGADOS NATURAIS E RECICLADOS	18
2.7. O PAPEL DOS AGENTES ECONÓMICOS [4]	18
2.7.1. A ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO	19
2.8. POSSÍVEIS MEDIDAS A UTILIZAR PARA A PROMOÇÃO DA REUTILIZAÇÃO E RECICLAGEM DE RCD's	20

3. PROPRIEDADES DE AGREGADOS E BETÕES RECICLADOS DE RCD's – ALGUNS CASOS DE ESTUDO25

3.1. REINCORPORAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS EM NOVAS AMASSADURAS.....25

3.1.1. INTRODUÇÃO25

3.1.2. TRATAMENTO DE SEPARAÇÃO26

3.1.3. SEPARAÇÃO DA FRACÇÕES INERTES27

3.1.3.1. Técnicas de Separação aplicáveis27

3.1.4. PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS DE BETÃO27

3.1.5. MELHORAR A QUALIDADE DOS AGREGADOS RECICLADOS – RECOMENDAÇÕES [21]30

3.2. PRODUÇÃO DE BETÃO COM AGREGADOS RECICLADOS30

3.2.1. PRODUÇÃO EM CENTRAL DE BETÃO PRONTO30

3.2.2. ADERÊNCIA DA NOVA ZONA DE INTERFACE [18].....31

3.3. BETÃO PRODUZIDO COM AGREGADOS RECICLADOS – CASOS DE ESTUDO32

3.3.1. UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS FINOS RECICLADOS DE BETÃO EM NOVAS AMASSADURAS.....32

3.3.1.1. Propriedades dos betões com igual trabalhabilidade [26] [27]32

3.3.1.2. Propriedades dos betões com igual relação A/C [27].....34

3.3.2. UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS GROSSOS RECICLADOS DE BETÃO EM NOVAS AMASSADURAS35

3.3.2.1. Propriedades dos betões reciclados [28].....36

3.3.2.2. Trabalhabilidade dos betões reciclados garantida com adição de adjuvantes [41]39

3.4. DIRECTRIZES DE CARÁCTER NORMATIVO RELATIVAS AO EMPREGO DE AGREGADOS GROSSOS RECICLADOS41

3.4.1. ESPANHA [24]41

3.4.2. PORTUGAL.43

3.4.2.1. Percentagens de substituição permitidas.44

4. VIABILIDADE DO EMPREGO DE AGREGADOS RECICLADOS47

4.1. VIABILIDADE DA PRODUÇÃO EFECTIVA DE RCD's DE QUALIDADE47

4.1.1. VIABILIDADE DO APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO47

4.1.2. VIABILIDADE DO APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DE DEMOLIÇÃO50

4.2. VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DOS AGREGADOS DERIVADOS DE RCD's51

4.2.1. APLICAÇÕES EM AGREGADOS INDIFERENCIADOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL51

4.2.1.1. Aplicações em estradas.51

4.2.1.2. Aplicações em solos	54
4.2.1.3. Aplicações em edifícios	54
4.2.3. APLICAÇÕES EM AGREGADOS PARA BETÃO	55
4.2.3.1. Aplicações como agregados para betão simples em estradas, sem requisitos estruturais	55
4.2.3.2. Aplicações como agregados para betão simples em edifícios, sem requisitos estruturais	56
4.2.3.3. Aplicações como agregados para betão simples e armado.....	56
 5. CONCLUSÃO	59
5.1. CONCLUSÕES GERAIS.....	59
5.2. PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO.....	60
 BIBLIOGRAFIA.....	61
 ANEXOS.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 – Exemplo de resíduos de construção e demolição [1]	1
Fig.2 – Ciclo ideal para os resíduos de betão [2].....	2
Fig. 3 – Abordagem ao ciclo de vida de um edifício [5].....	6
Fig.4 – Exemplo de resíduos de construção na obra do shopping Vivaci da Maia	7
Fig. 5 e 6– Exemplos de pinça e tesoura hidráulicas [8]	10
Fig.7 e 8 – Operações de demolição com o auxílio máquinas giratórias de rastros [2] [8]	10
Fig. 9 – Processamento de RCD's em central móvel [11].....	16
Fig.10 – Processamento de RCD's em central fixa [11].....	16
Fig. 11 e 12 – Exemplo de separação granulométrica de agregados reciclados [2].....	16
Fig.13 – Esquema de processamento de RCD's em central fixa de reciclagem [11].....	17
Fig. 14 – Aspecto final de composições de misturas de agregados reciclados [12]	17
Fig.15 e 16 – Exemplos de despejos de RCD's em zonas verdes [14].....	22
Fig. 17 – Esquema de recepção, descarga e triagem dos resíduos abrangidos pelo projecto REAGIR [12]	23
Fig. 18 – Esquema de fragmentação, crivagem e armazenamento dos agregados reciclados produzidos no âmbito do projecto REAGIR [12].....	23
Fig. 19 – Identificação dos oito municípios envolvidos no projecto CONVERTER [16]	24
Fig. 20 – Localização do novo Centro de Triagem e Valorização de RCD's do projecto CONVERTER [16]	24
Fig. 21 – Esquema sucinto de tratamento de separação de qualidade crescente [17].....	26
Fig. 22 e 23 – Agregados grossos reciclados de betão [11] [21].....	28
Fig. 24 – Nova zona de interface em betão produzido com agregados reciclados [18].....	31
Fig. 25 e 26 – Exemplos de “ecopontos” da fase de estruturas da obra adjacente ao Estádio do Dragão.....	48
Fig. 27 e 28 – Exemplos de “ecopontos” da fase de estruturas da obra do shopping da Maia	49
Fig. 29 e 30 – Exemplos de “ecopontos” big-bags da obra do shopping da Maia	49
Fig. 31 e 32 – Tratamento de RCD's na empresa Trianovo [42]	49
Fig. 33, 34 e 35 – Formas de recolha de RCD's efectuada pela empresa Trianovo [42]	50
Fig. 36 e 37 – Exemplos de centrais móveis (à esquerda) e fixas (à direita) [11].....	51
Fig. 38 e 39 – Exemplos de aplicação de agregados reciclados em estradas [11].....	52
Fig. 40 – Esquema de dreno longitudinal [43]	52
Fig.41 e 42 – Exemplo de aplicação de agregados reciclados na recuperação de caminhos rurais [44]	53

Fig.43 e 44 – Exemplo de aplicação de agregados reciclados em cestos de gabiões e na estabilização de taludes	53
Fig.45 e 46 – Exemplos de aplicação de agregados reciclados na construção de edifícios [45]	54
Fig.47 – Exemplos de aplicação de agregados reciclados na construção de bases de piscinas [46]..	55
Fig.47 – Exemplo de aplicação de agregados reciclados na construção de passeios	55

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Técnicas de separação de agregados de alvenaria e de betão [19].....	27
Quadro 2 – Principais propriedades dos agregados finos [26].....	32
Quadro 3 – Composições dos betões e respectivos abaixamentos [26].....	33
Quadro 4 – Composição das amassaduras e propriedades dos agregados, em kg/m ³ [27]	34
Quadro 5 – Resistência à compressão (MPa) dos cubos de betão [27]	35
Quadro 6 – Principais propriedades dos agregados grossos naturais e reciclados.....	36
Quadro 7 – Principais propriedades dos betões com agregados grossos reciclados.....	37
Quadro 8 – Principais propriedades dos agregados finos e grossos [41]	39
Quadro 9 – Efeito da adição de adjuvantes em betões reciclados [41]	40
Quadro 10 – Propriedades exigidas aos agregados e à mistura em Espanha [25]	42
Quadro 11 – Limites máximos de resistência à compressão, em alguns países/organizações [24]	42
Quadro 12 – Classes de resistência e classes de exposição ambiental permitidas [10]	44
Quadro 13 – Quantidades de betão pronto e dos respectivos agregados [47]	56

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DA DISSERTAÇÃO

Numa altura em que, algumas das construções de betão armado atingem o final da sua vida útil, levanta-se a questão do que fazer aos despojos resultantes das respectivas demolições/operações de restauro ou conservação (figura 1). Os depósitos existentes começam a atingir um ponto de saturação, a partir do qual será necessário efectuar estudos para novas localizações de aterros de resíduos de construção e demolição. No entanto, estas pressões sobre o recurso “solo”, acarretam uma série de impactes ambientais que urge reduzir para garantir o desenvolvimento sustentável. Quando por um lado, se preenchem com resíduos as verdadeiras “crateras” criadas para aterros, abrem-se novas “crateras” para extracção de agregados e de pedra natural. Como o sector da construção é grandemente responsável pelo consumo dos agregados extraídos para os mais diversos fins, conclui-se que estas solicitações sobre os solos não são compatíveis com um desenvolvimento que garanta a disponibilidade de recursos equitativa para as gerações vindouras.



Fig. 1 – Exemplo de resíduos de construção e demolição [1]

Tendo em consideração as questões anteriores e assumindo cada vez mais uma atitude responsável para com o ambiente, surge a oportunidade de transformar os despojos das habitações resultantes, tanto da fase de construção como da fase de conservação/restauro ou demolição, na matéria-prima de outros projectos ou trabalhos de construção civil, através de processos de reutilização/reciclagem. Nesse sentido é necessário garantir que os resíduos tenham uma qualidade mínima aceitável de acordo com o fim a que se destinam. Neste ponto abrem-se duas vertentes distintas, a criação da oportunidade em obra, ainda na fase de construção para separar os resíduos, evitando a sua mistura indiferenciada, seguida do respectivo transporte para centrais de recuperação e, mais tarde, no final da vida útil do edifício, a prestação da devida atenção e cuidado relativamente ao processo de demolição. É nesta última fase, na passagem que ocorre entre a existência do edifício a demolir e a existência apenas dos

seus despojos, que se pode garantir a qualidade do produto final “resíduo” de demolição e assegurar a viabilidade de todo o processo de reciclagem. O processo de demolição, quando bem gerido e orientado para a reciclagem, através da adopção de procedimentos de demolição do tipo selectiva, garante ao produto final características que lhe permitem ser usado em várias aplicações. No entanto, a demolição selectiva é inimiga dos ritmos de obra que se pretendem hoje em dia, sendo necessário ter presente que este processo é mais demorado, podendo requerer o uso de mão-de-obra especializada, para a recolha dos materiais mais valiosos e daqueles que possam reduzir a qualidade dos resíduos quando com eles misturados. Após o processo de demolição (preferencialmente do tipo selectiva) e remoção das armaduras, o resíduo está apto a ser desmantelado e reduzido a agregados reciclados, em centrais móveis ou fixas, originando um novo material vendável cujo leque de aplicações é bastante vasto e está ainda por explorar em toda a sua plenitude em Portugal.

A mais nobre aplicação dos agregados reciclados será a sua incorporação em novas amassaduras para confecção de betão estrutural, conforme discutido no âmbito deste trabalho. A utilização dos agregados reciclados na produção de novos betões implica que haja uma estratégia nacional sobre esta temática que a viabilize e incentive. Este planeamento ou gestão dos resíduos deve atender aos seguintes aspectos [2]:

- maior controlo sobre a geração de resíduos, através de processos de demolição selectiva;
- melhoria das características de ordenamento do território, evitando a criação de mais aterros para atender às solicitações provocadas pela enorme quantidade que os resíduos de construção e demolição representam;
- dar resposta às preocupações ambientais, diminuindo a produção de agregados naturais novos;
- consciencialização dos cidadãos relativamente a novos processos de desconstrução (demolição selectiva), à correcta gestão dos RCD's e principalmente, à desmistificação das barreiras psicológicas que existem em torno da qualidade dos produtos reciclados.

Relativamente aos resíduos de construção e demolição, vulgo RCD's, o fim da vida útil do edifício não implica necessariamente o fim da utilidade dos seus componentes, podendo estes, após processo de transformação, incorporar um novo ciclo noutro elemento construtivo, ou até em novas aplicações fora do âmbito da construção. Evidencia-se neste trabalho o exemplo do reaproveitamento dos produtos da reciclagem, com destaque para os agregados reciclados, que estão então aptos a pertencer a um novo ciclo aquando da sua incorporação em novos betões, segundo o esquema que se pode observar na figura 2.

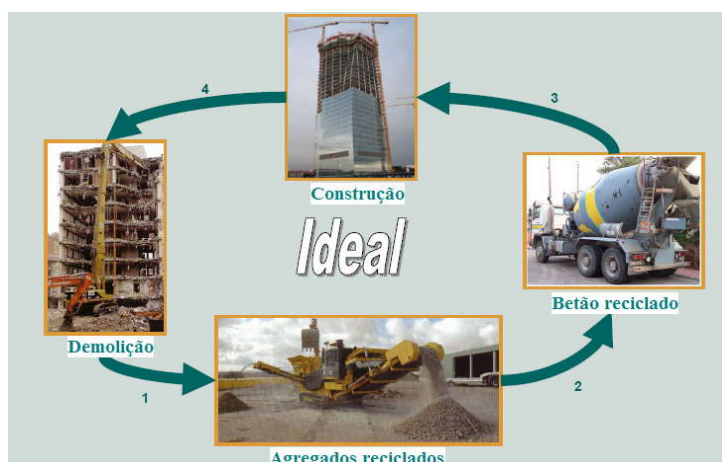


Fig. 2 – Ciclo ideal para os resíduos de betão [2]

1.2. OBJECTIVOS DA DISSERTAÇÃO

A motivação para a realização deste trabalho surge com o objectivo de poder contribuir para a exploração do tema e para o despertar de atitudes que protejam o ambiente por parte dos agentes que intervêm na área da construção em Portugal. Sendo um tema muito actual hoje em dia, visto que alguns países há já vários anos se viram forçados a aproveitar os seus entulhos por falta de inertes naturais, enquanto que outros, como Portugal, devido à **actual** abundância e a outros interesses, só presentemente estão a prestar mais atenção aos seus resíduos.

Pretende-se com este trabalho, estudar várias aplicações para a utilização dos agregados reciclados visando o seu escoamento. Pretende-se de igual forma, analisar a viabilidade técnica da sua reincorporação em novos betões, designados por betões reciclados, constituindo actualmente o fim mais nobre que se pode dar aos agregados reciclados. Nesse sentido, foi efectuado um levantamento do estado actual do conhecimento a nível nacional e internacional, das propriedades técnicas dos betões reciclados quer com substituição de agregados finos, quer com agregados grossos, separadamente. Neste ponto, estabeleceu-se ainda uma comparação entre as especificações portuguesas e as indicações espanholas, sendo que estas últimas ainda não possuem carácter de obrigatoriedade, relativas à aplicação segura de agregados grossos reciclados na produção de betões de ligantes hidráulicos.

Com este trabalho, após um levantamento exaustivo das principais propriedades técnicas dos agregados reciclados, pretendeu-se de igual forma contribuir para reduzir as barreiras psicológicas relacionadas com o descrédito atribuído às suas qualidades. Este aspecto tem grande importância, sendo esta resistência uma das maiores responsáveis para a não proliferação da utilização dos agregados reciclados, maioritariamente devida ao desconhecimento geral das suas propriedades, tidas como negativas a priori.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é apresentado em cinco capítulos. O capítulo 1, constitui um capítulo introdutório, seguido de três capítulos de aprofundamento do tema. No último capítulo, apresentam-se as principais conclusões observadas.

O primeiro capítulo pretende apresentar uma visão geral sobre as preocupações em torno dos RCD's. De igual forma pretende elencar os principais objectivos que motivaram a realização deste trabalho, assim como, a estrutura em que este se encontra dividido.

No capítulo 2, pretende-se expor as principais vertentes e preocupações ambientais levantadas pela existência de um grande volume de resíduos de composição bastante heterogénea, resultantes de obras de construção e de demolição que diariamente são produzidos, ao mesmo tempo que se reflecte sobre o seu destino.

O capítulo 3, é um capítulo dedicado à pesquisa de documentação existente referente à substituição da fracção inerte natural, por agregados reciclados, devidamente seleccionados, para incorporação em novas amassaduras de betão estrutural. Em primeiro lugar, apresentam-se as principais propriedades dos agregados reciclados, em função da granulometria e consequentemente da quantidade de argamassa aderida à sua superfície. Posteriormente, tendo presente que cada estudo tem como base os seus próprios pressupostos e respectivas condições laboratoriais, pretendeu-se apresentar as principais conclusões de âmbito geral referentes às propriedades dos betões reciclados.

No capítulo 4, com base na pesquisa bibliográfica de suporte à realização dos capítulos anteriores, pretendeu-se aprofundar o estado do conhecimento relativo às possibilidades de aplicação dos agregados reciclados de RCD's em várias áreas da engenharia e construção civil, assim como se apresentam novas sugestões, podendo algumas carecer de estudos mais aprofundados.

Finalmente no capítulo 5, é apresentada uma síntese geral do trabalho, resumem-se as principais conclusões e sugerem-se novas linhas de prosseguimento deste tema, que carece ainda de bastantes estudos e motivação, para que a realidade do aproveitamento dos resíduos da construção e demolição comece a ter verdadeiramente expressão em Portugal.

2

ENQUADRAMENTO DA PROBLEMÁTICA DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

2.1. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

2.1.1. INTRODUÇÃO

Os resíduos de construção e demolição, vulgo RCD's, como o próprio nome indica, têm origem na demolição, restauração e construção de edifícios, assim como, construção e reabilitação de estradas e obras hidráulicas. Excepcionalmente podem ter origem em desastres naturais e tecnológicos. Os diferentes constituintes dos resíduos provenientes de obras de construção de edifícios, possuem num dado instante, uma distribuição quantitativa e qualitativa relativamente ao total de resíduos produzidos nessa obra, que depende da fase da construção e da tecnologia utilizada [3]. No caso de demolição de habitações, a composição e quantidade destes resíduos depende da época em que o edifício foi construído e consequentemente dos materiais e técnicas utilizadas. Ao longo deste trabalho será dada especial atenção aos resíduos provenientes de edifícios com estrutura em betão armado, cujo material resultante, após triagem e trituração encerra em si um forte potencial de reutilização.

O ciclo de uma construção, que pode ser visualizado na figura 3, implica a recepção das matérias primas e materiais necessários à construção propriamente dita, o período de utilização ao longo do qual podem ocorrer operações de manutenção e reabilitação e a fase de demolição do património edificado. Com a excepção do período de utilização, em todas as fases do ciclo se geram resíduos passíveis de tratamento. Este tratamento pode ser administrado com o intuito de reutilizar, reciclar ou apenas de depositar em aterro.

2.1.2. IMPORTÂNCIA DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Estima-se que o volume de RCD's em Portugal ascenda a cerca de 325 kg por pessoa, em cada ano, valor este, avaliado com exclusão do solo proveniente das escavações e do material resultante da manutenção e reabilitação de estradas [4]. Visto que, no nosso país eram praticamente inexistentes as restrições ao depósito em aterro e as formas de reaproveitamento dos materiais, conclui-se que o volume estimado seja todo depositado em aterros e que, uma boa parte seja abandonada ou depositada de forma ilegal. Por estes motivos, urge implementar medidas de gestão dos resíduos, de forma a diminuir as quantidades transportadas para aterro, ao mesmo tempo que se protegem os recursos naturais da depauperação.

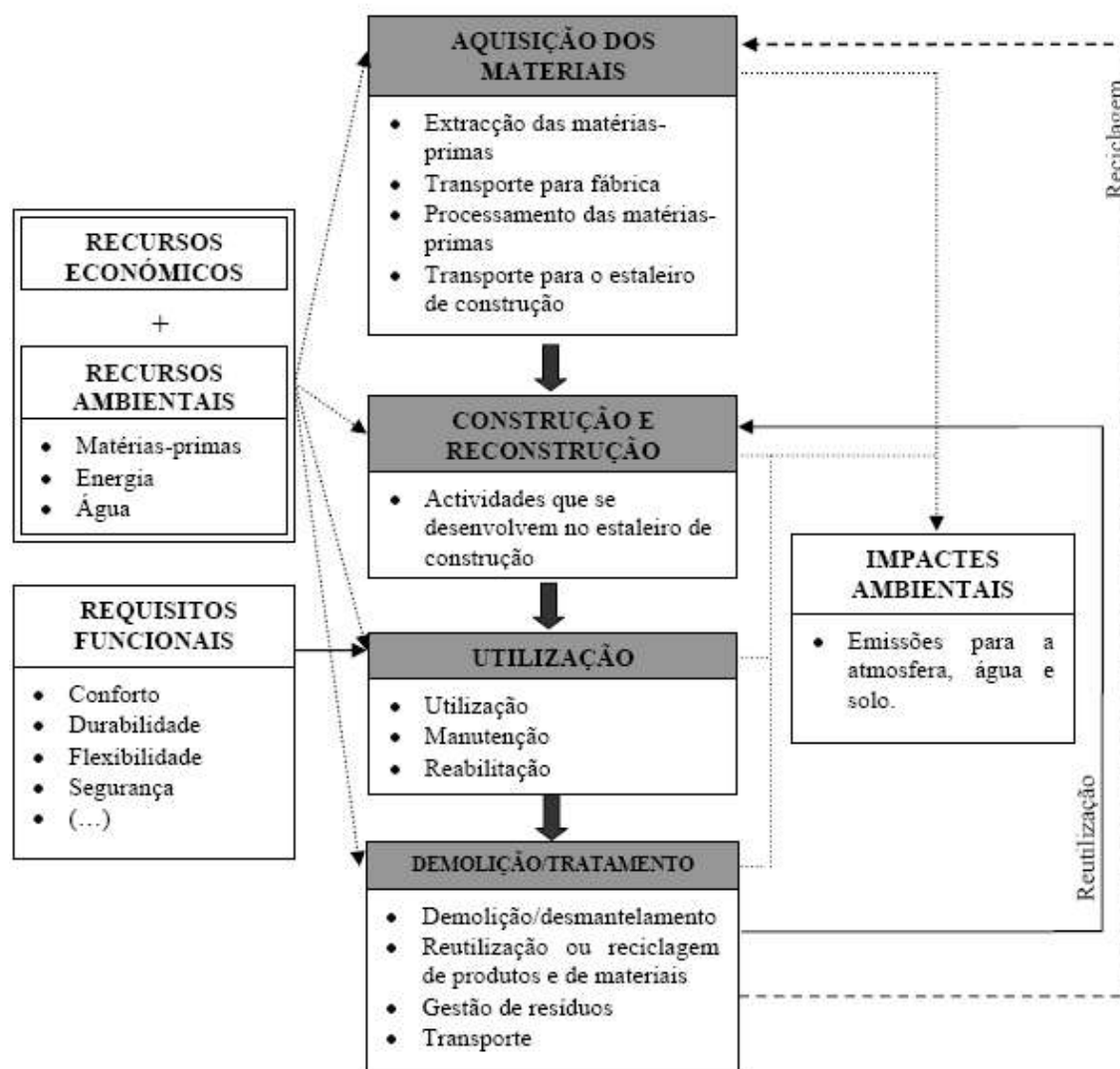


Fig. 3 – Abordagem ao ciclo de vida de um edifício [5]

2.2. CONSTITUIÇÃO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO [4]

O termo RCD's é utilizado para denominar uma série de materiais, entre os quais se destacam:

- resíduos provenientes da demolição parcial ou total de edifícios e/ou de infraestruturas de engenharia civil;
- resíduos provenientes da construção de edifícios e/ou de infraestruturas de engenharia civil;
- solo, rochas e vegetação resultantes do nivelamento de terrenos, trabalhos de construção civil e/ou trabalhos gerais de fundações;
- nivelamento de estradas e outros materiais associados à actividade de manutenção das mesmas.

Existem diferenças notáveis, no que concerne à constituição dos resíduos de construção e dos resíduos provenientes de demolições, havendo maior grau de diferenciação no volume de resíduos das construções. A constatação anterior prende-se com o facto de que nas obras de construção, o director de obra e/ou empreiteiro sabem exactamente que materiais são trazidos para o local da obra, havendo

apenas incerteza quanto à constituição do solo a escavar, enquanto que nas obras de demolição é inevitável a ocorrência da mistura dos resíduos e consequentemente, a sua composição final é muito heterogénea.

Os resíduos de construção são constituídos, entre outros, por quatro grandes categorias [4]:

- materiais danificados, de qualidade imprópria para aplicação;
- sobras de excesso de materiais;
- materiais intermediários, necessários à produção de outros materiais;
- embalagens e invólucros de materiais a aplicar na obra.

Nas obras de construção, a participação e cooperação de empreiteiros e de todos os agentes presentes em obra, incluindo o pessoal, é fundamental para o processo de selecção e separação, no entanto, estes ainda pensam que estas operações abrandam o ritmo de trabalho, requerem mais trabalhadores e necessitam de uma reorganização da disposição das obras, alterando as composições habituais do estaleiro. Como as consequências anteriores da selecção e separação dos resíduos de construção envolvem mais custos, estes agentes, infelizmente, apresentam-se pouco receptivos a estas actividades, sendo necessário incentivá-los. No sentido de encorajar e implementar estas actividades nas obras de construção, é necessária a criação de medidas incentivadoras para aqueles que fazem esforços para a reciclagem dos resíduos de construção e penalizações para os que não participam e tendem a despejar estes resíduos em locais impróprios [3].



Fig.4 – Exemplo de resíduos de construção na obra do shopping Vivaci da Maia

No que respeita às demolições, algumas das actividades fulcrais que se podem encontrar numa operação de demolição e das quais resultam obrigatoriamente resíduos, são seguidamente elencadas:

- remoção de materiais seleccionados da estrutura pré-existente, com possível tratamento in situ;
- demolição da estrutura, separação em pilhas diferenciadas de resíduos e posterior tratamento com vista à reciclagem ou ao depósito;
- limpeza das áreas circundantes (remoção de tubagens e de vegetação);
- preparação do local para venda ou construção.

Uma forma de combater a incerteza associada à constituição dos RCD's, seria a existência de um plano de demolição ou estudo prévio de demolição, onde fossem identificados os materiais e seleccionadas as técnicas mais apropriadas. Alguns dos principais aspectos que estes planos deveriam contemplar são seguidamente enumerados [6]:

- reunir e trabalhar estreitamente com o projectista, dono de obra, fiscalização e empreiteiro;
- efectuar uma lista de materiais reutilizáveis;
- definir prioridades consoante os volumes previsíveis dos materiais a reciclar;

- escolher os materiais que vão ser separados;
- escolher a sequência de desmantelamento;
- identificar os locais ou espaços necessários onde vão ser separados, desmantelados e reciclados os materiais e resíduos gerados;
- dar formação e manter informados, esclarecidos e motivados todos os empregados no que se refere às necessidades do processo da reciclagem.

Surge, no entanto, uma outra actividade que influencia todo o processo doravante na medida em que, garante a capacidade de reutilização ou de reciclagem dos materiais. A esse processo dá-se a designação de demolição selectiva.

2.2.1. PERIGOSIDADE DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A classificação por códigos dos resíduos de construção e demolição e respectiva perigosidade consta da Portaria 209, de 3 de Março de 2004, designada por Lista Europeia de Resíduos (LER) dos Resíduos de Construção e Demolição. Nesta lista, identificam-se os resíduos considerados perigosos com a simbologia «*», de acordo com critérios estabelecidos na Directiva 91/689/CEE relativa a resíduos perigosos. Na Portaria 209/04, no anexo I, são identificados pelos respectivos códigos, os resíduos pertencentes à LER e no anexo II são apresentadas as características de perigosidade atribuíveis aos resíduos, em conformidade com o anexo III da Directiva 91/689/CEE. A interpretação deste código (LER) baseia-se num número de seis dígitos para cada tipo de resíduos e, respectivamente, de dois e quatro dígitos para os números dos capítulos e subcapítulos. De salientar que, os resíduos de construção e demolição (incluindo solos escavados de locais contaminados) pertencem ao capítulo 17, logo possuem o código 17 00 00. O excerto da portaria 209/2004, relativa ao capítulo 17, referente aos resíduos de construção e demolição, encontra-se disponível para consulta nos anexos deste trabalho.

No entanto, será de salientar que, muito poucos materiais com designação de RCD são invariavelmente perigosos, sendo este termo baseado em níveis de toxicidade e inflamabilidade, entre outros aspectos. Será de destacar, que será mais fácil realizar o controlo sobre os materiais perigosos e respectiva separação em locais de construção, do que em locais de demolição e por sua vez, será mais fácil este controlo em construções maiores, do que em construções menores, devido à escala do projecto e à quantidade de resíduos gerada.

Em qualquer situação existente num ambiente de obra, seja ela de construção ou de demolição, a tendência é para ocorrer o espalhamento, a contaminação e a mistura dos materiais. A contaminação com materiais perigosos para a saúde pública como são exemplo, o amianto, os metais pesados, alguns solventes, fibras minerais, algumas tintas, e os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (materiais que no seu processo produtivo contactem com fumos de combustão, materiais betuminosos, etc), entre outros, é uma das mais graves preocupações no tratamento dos resíduos. Salienta-se que, o amianto foi um constituinte amplamente utilizado na construção civil no passado e por isso, é vulgar encontrar este componente nas obras de demolição em materiais tais como, fibrocimento, chapas isotérmicas, pavimentos vinílicos, colas, tectos falsos, isolamentos térmicos e acústicos, isolamento de tubagens, portas corta-fogo, revestimentos em tectos e paredes (tintas), telas impermeabilizantes, tecidos retardadores de incêndio, entre muitos outros, requerendo necessariamente o uso de mão-de-obra especializada na sua remoção.

O conceito de perigosidade é relativo e pode ser diferido no tempo, ou seja, os RCD's podem ter na sua constituição materiais que originalmente eram perigosos, ou que se tornaram perigosos por

contágio com o ambiente a que foram expostos e por último podem tornar-se perigosos quando são colocados em contacto, ou são misturados com materiais perigosos. Neste sentido, visto que os materiais que abandonam a obra após demolição, são a matéria-prima de todo o processo “reciclador”, torna-se necessário um apertado controlo de qualidade, de forma a garantir que o seu grau de contaminação seja o mais reduzido possível [6].

2.3. DEMOLIÇÃO SELECTIVA [6]

Quando se tem como objectivo último de uma operação de demolição, o reaproveitamento dos materiais resultantes e respectiva reciclagem, não se podem dissociar os conceitos de demolição e reciclagem. Para a conjugação proveitosa destes dois conceitos, surge a definição de demolição selectiva. O termo, Demolição Selectiva, está forçosamente interrelacionado com as actividades de Reciclagem/Depósito em Aterro, na medida em que é uma das formas de garantir que não há mistura de materiais devido à sua separação na fonte. A demolição selectiva tem como objectivo a produção de resíduos recicláveis e/ou reutilizáveis com o mínimo de heterogeneidade e sem estarem contaminados por materiais que impeçam o processo, ou que diminuam as qualidades finais do produto reciclado. Este processo de demolição surge em oposição à demolição dita tradicional que vigora actualmente devido à exigência de ritmos mais acelerados, na qual não são tidos em consideração quaisquer tipos de cuidados de triagem, recuperação de materiais, produtos e componentes. No entanto, nem sempre foi assim em Portugal visto que no passado a demolição dita tradicional era efectivamente selectiva, quando os custos de mão-de-obra eram baixos face ao valor dos materiais e a sociedade tinha um espírito mais “recuperador”. É facilmente perceptível que a demolição selectiva tem custos inerentes muito superiores aos da demolição tradicional actual, maioritariamente relacionados com o tempo de espera até ao desmantelamento da estrutura do edifício [7].

A tendência dos custos de demolição será para aumentar, logo, será necessário garantir elevadas taxas de reciclagem para tornar este processo viável economicamente. Por este motivo espalham-se pela Europa métodos e processos de demolição com o objectivo de maximizar a quantidade de resíduos recicláveis e/ou reutilizáveis, tendo como consequência salutar, o menor volume de resíduos transportados para aterro. A este tipo de processos e métodos aplicados na demolição, chama-se demolição selectiva.

Esta operação encerra uma série de sub-actividades que podem decorrer na seguinte ordem, sucintamente apresentada:

- remoção selectiva de materiais acessíveis com valor comercial, ou materiais que ainda não atingiram o final da sua vida útil;
- remoção selectiva de materiais acessíveis, que se não forem removidos, obrigam ao tratamento dos RCD's como materiais perigosos, por exemplo, o amianto;
- remoção selectiva de materiais acessíveis, que se não forem removidos, diminuirão o valor dos RCD's após fragmentação, por exemplo a madeira, o plástico e o gesso;
- tratamento químico, in situ, dos materiais contaminados por exposição a ambientes agressivos, seguido de remoção dos mesmos.

Para a selecção de alguns materiais com valor comercial ou aqueles que ainda não atingiram o final da sua vida útil, tais como, madeiras, telhas, vidros, caixilharias, serralharias e carpintarias, utilizam-se maioritariamente ferramentas manuais. Neste ponto, pode-se destacar que a indústria da demolição tem evoluído nos últimos anos no sentido de aperfeiçoar as técnicas de demolição de elementos de

betão armado, visto que a altura do edifício, a produção de ruídos, vibrações e poeiras são condicionantes que não existiam no passado e que actualmente devem ser tidas em consideração no processo de escolha do método de demolição. Neste sentido, em Portugal proliferam as técnicas de demolição por máquinas hidráulicas de forma a satisfazer os requisitos anteriores.

Para a separação dos elementos de betão armado, são utilizadas ferramentas específicas como as tesouras e as esmagadoras hidráulicas (figuras 5 e 6) que permitem a separação dos aços e a trituração do betão. Posteriormente às operações de remoção dos materiais ditos “valiosos”, a estrutura é desmantelada, ou demolida, com o recurso a equipamento pesado como se podem denominar as tesouras e pinças hidráulicas, martelos hidráulicos, pulverizadores e/ou esmagadoras, escavadoras entre outros. Algumas destas ferramentas são normalmente acopladas a máquinas giratórias, que normalmente desempenham outras funções na construção (figuras 7 e 8). Seguidamente o betão é triturado, enquanto o aço mantém a sua dimensão.



Fig. 5 e 6 – Exemplos de pinça e tesoura hidráulicas [8]



Fig. 7 e 8 – Operações de demolição com o auxílio máquinas giratórias de rastros [2] [8]

Se estas actividades decorrerem com sucesso, deverá no final da demolição existir uma larga quantidade de resíduo inerte, que será constituída maioritariamente por betão, tijolos, cerâmicos e gesso. Enumeram-se, em seguida, algumas das vantagens associadas à escolha deste processo de demolição [6] [7]:

- promove um aumento da reciclagem dos resíduos e, por conseguinte, melhora a performance ambiental;
- aumenta a qualidade dos resíduos, permitindo a sua utilização, após o tratamento da reciclagem, em actividades ou fabrico de produtos de maior valor acrescentado;
- diminui a quantidade dos resíduos a depositar em aterro;
- redução dos custos em taxas ambientais e em transporte e deposição em aterro;
- permite a criação de uma nova indústria, com o consequente aumento do número de postos de trabalho, emprego directo e indirecto, quer no processo de demolição, quer no processo de reciclagem.

No entanto, os inconvenientes inerentes a este processo prendem-se naturalmente com o factor tempo de espera até ao desmantelamento da estrutura e o impedimento da utilização de processos de demolição mais expeditos e deveras mais rápidos. Salientam-se, algumas das desvantagens:

- maior morosidade associada à fase de demolição;
- utilização de métodos com incorporação de mão-de-obra intensiva;
- necessidade de utilizar instalações de reciclagem, fixas ou móveis;
- necessidade de equipamento especializado, pouco utilizado em obra;
- necessidade de operários especializados;
- requer mais espaço disponível;
- só permite a utilização de métodos expeditos, após a separação dos materiais.

A opção por este processo de demolição é primordial, quando o fim a que se destinam os resíduos resultantes da demolição são a reutilização e/ou a reciclagem. Actualmente este tipo de processo ainda constitui uma opção à demolição tradicional que vigora actualmente, facto que mudaria radicalmente se fossem impostas medidas políticas adequadas tais como, garantir percentagens mínimas de recuperação de materiais e adoptar valores relativamente elevados para deposição em aterro [7].

Uma das formas de contribuir para facilitar as práticas de demolição selectiva, prende-se com a própria técnica de construção que deu origem ao edifício. Pode-se destacar, que sempre que a construção é realizada por camadas, caracterizadas pelo tipo de ligação entre os materiais, o processo de demolição selectiva é facilitado e no limite, pode-se até conceber um edifício com o objectivo último de simplificar a separação dos seus componentes no final da sua vida útil. Conclui-se desta forma que a contribuição para uma eficiente gestão de resíduos, tem como base o próprio projecto de execução do edifício que no futuro irá ser demolido, nomeadamente, alterar a forma de concepção de um edifício para futuramente originar uma redução de resíduos, através da aplicação de materiais com potencial de reutilização ou reciclagem e encorajar a aplicação de materiais reciclados na nova construção. Estas medidas preventivas, que actuam a montante da própria execução da obra, poderão ser, talvez mais eficazes do que propriamente a demolição selectiva e posterior tratamento de resíduos [7].

A fase de concepção de um edifício aparece como a fase que mais pode beneficiar o processo de desconstrução, potenciando a maximização da valorização dos materiais e componentes do edifício. Assim, é nesta fase que devem ser totalmente conhecidos e identificados os materiais utilizados e que estes sejam facilmente separáveis e reutilizáveis, acarretando esta preocupação para as fases posteriores de construção, utilização e demolição do edifício.

2.4. GESTÃO DE RESÍDUOS

2.4.1. LEGISLAÇÃO GERAL

A abordagem a uma eficaz gestão de resíduos considera medidas sequenciais com relações de valor hierárquico entre si, tais como, a primazia da prevenção e da redução à reutilização. Por outro lado, a reutilização é preferível ao invés do recurso a processos de reciclagem e recuperação (incluindo o uso de resíduos como fonte de energia). As medidas de deposição em aterro ou de incineração sem recuperação de energia, são preteridas face às referidas anteriormente.

Em Portugal, surge desta forma, o Decreto-Lei 178/2006 que estabelece o regime geral da gestão de resíduos, transpondo para a ordem jurídica interna, a directiva nº 2006/12/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho de 5 de Abril, e a Directiva 91/689/CEE, do Conselho de 12 de Dezembro. Este decreto-lei aplica-se às operações de gestão de resíduos, compreendendo toda e qualquer operação de recolha, transporte, armazenagem, triagem, tratamento, valorização e eliminação de resíduos, bem como, às operações de descontaminação de solos e à monitorização dos locais de deposição.

Nesta legislação, através do artigo 5º, referente ao “Princípio da Responsabilidade pela Gestão”, é identificado como responsável pelo destino dos resíduos, **o próprio produtor**, salvo se, a produção diária de resíduos não exceder 1100 l, situação em que é o próprio município que fica encarregado da sua gestão. A responsabilidade extingue-se pela transmissão dos resíduos a operador licenciado de gestão de resíduos ou, pela sua transferência para as entidades responsáveis por sistemas de fluxos de resíduos.

A relação hierárquica da gestão dos resíduos pode ser exemplificada da seguinte forma:

- primeira opção - Prevenção ou Redução;
- segunda opção - Reutilização;
- terceira opção - Reciclagem ou recuperação de materiais;
- quarto opção - Recuperação de energia;
- última opção - Deposição em aterro de forma segura e controlada.

A relação anterior, está retratada no Decreto-Lei 178/2006, através do “Princípio da Hierarquia das Operações de Gestão de Resíduos”, estabelecendo os seguintes pontos:

- a gestão de resíduos deve assegurar que à utilização de um bem sucede uma nova utilização ou que, não sendo viável a sua reutilização, se procede à sua reciclagem, ou ainda a outras formas de valorização;
- a eliminação definitiva de resíduos, nomeadamente, a sua deposição em aterro, constitui a última operação de gestão, justificando-se apenas quando seja técnica ou financeiramente inviável a prevenção, a reutilização, a reciclagem, ou outras formas de valorização;
- os produtores de resíduos devem proceder à separação dos resíduos na origem, de forma a promover a sua valorização por fluxos e fileiras.

Neste sentido, a conduta e postura dos produtores e/ou detentores de RCD's face ao processo de reciclagem terá, necessariamente, de ter como base este mesmo princípio e seguir os seguintes preceitos [9]:

- a prevenção no fluxo de RCD's é de extrema importância; é necessário que exista uma redução da produção dos resíduos em cada fase do processo de construção, até à execução final da obra, mediante princípios de responsabilidade de gestão correcta por quem os origina;

- antes do início da obra, deverá ser efectuada uma inventariação dos RCD's que irão ser produzidos, tendo como objectivo proceder à identificação dos seus componentes perigosos, os quais, caso existam, deverão, sempre que possível, ser removidos selectivamente e encaminhados para operadores devidamente legalizados, sendo de realçar a eventual existência de material com amianto, cuja remoção e destino se deverá revestir de particular atenção;
- a recolha dos RCD's deverá ser efectuada em contentores apropriados devendo o transporte ser efectuado de forma a salvaguardar a protecção da saúde e do ambiente;
- a triagem dos diversos fluxos de resíduos inseridos nos RCD's deverá, sempre que possível, ser efectuada no local de produção devendo, nos casos em que isso não puder ocorrer, o produtor ou detentor proceder ao seu encaminhamento para uma unidade de triagem devidamente legalizada, na qual será efectuada a separação dos resíduos por fluxos específicos, tendo em atenção a sua posterior reciclagem e/ou valorização;
- promover a reutilização sempre que tecnicamente possível;
- as operações de gestão de RCD's, nomeadamente, triagem, armazenamento, valorização ou eliminação, devem ser efectuadas por operadores devidamente autorizados/licenciados.

Algumas definições contidas neste decreto-lei (178/06), são dignas de transcrição, no sentido em que, permitem ao leitor uma melhor apreensão de alguns conceitos mencionados ao longo deste trabalho:

“Centro de recepção de resíduos” – a instalação onde se procede à armazenagem ou triagem de resíduos inseridos, quer em sistemas integrados de gestão de fluxos de resíduos, quer em sistemas de gestão de resíduos urbanos;

“Descarga” – a operação de deposição de resíduos;

“Detentor” – a pessoa singular ou colectiva que tenha resíduos, pelo menos, na sua simples detenção nos termos da legislação civil;

“Eliminação” – a operação que visa dar um destino final adequado aos resíduos, nos termos previstos na legislação em vigor, nomeadamente, deposição sobre o solo ou no seu interior, por exemplo em aterro sanitário, entre outros.

“Fileira de resíduos” – o tipo de material constituinte dos resíduos, nomeadamente, fileira dos vidros, fileira dos plásticos, fileira dos metais, fileira da matéria orgânica ou fileira do papel e cartão;

“Fluxo de resíduos” – o tipo de produto componente de uma categoria de resíduos transversal a todas as origens, nomeadamente, embalagens, electrodomésticos, pilhas, acumuladores, pneus ou solventes;

“Instalação” – a unidade fixa ou móvel em que se desenvolvem operações de gestão de resíduos;

“Plano” – o estudo integrado dos elementos que regulam as acções de intervenção no âmbito da gestão de resíduos, identificando os objectivos a alcançar, as actividades a realizar, as competências e atribuições dos agentes envolvidos e os meios necessários à concretização das acções previstas;

“Prevenção” – as medidas destinadas a reduzir a quantidade e o carácter perigoso para o ambiente e para a saúde, dos resíduos e materiais ou substâncias neles contidas;

“Produtor” – qualquer pessoa, singular ou colectiva, agindo em nome próprio ou prestando serviço a terceiros, **cujas actividades produza resíduos** ou efectue operações de pré-tratamento, de mistura ou outras que alterem a natureza ou a composição dos resíduos;

“Reciclagem” – o reprocessamento de resíduos com vista à recuperação e/ou regeneração das suas matérias constituintes, em novos produtos a afectar ao fim original ou ao fim destino;

“Recolha” – a operação de apanha, selectiva ou indiferenciada, de triagem e/ou mistura de resíduos com vista ao seu transporte,

“Resíduo” – qualquer substância ou objecto de que o detentor se desfaz, ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer, nomeadamente, os identificados na Lista Europeia de Resíduos, ou outros, entre os quais se encontram os resíduos de construção e demolição;

“Reutilização” – a reintrodução, **sem alterações significativas**, de substâncias, objectos ou produtos nos circuitos de produção ou de consumo, de forma, a evitar a produção de resíduos;

“Tratamento” – o processo manual, mecânico, físico, químico ou biológico que altere as características dos resíduos, de forma, a reduzir o seu volume ou perigosidade, bem como, a facilitar a sua movimentação, valorização ou eliminação após as operações de recolha;

“Triagem” – o acto de separação de resíduos, mediante processos manuais ou mecânicos, sem alteração das suas características, com vista, à sua valorização ou a outras operações de gestão.

2.4.2. LEGISLAÇÃO ESPECÍFICA (DECRETO-LEI 46/2008)

Finalmente, surge em Portugal uma legislação específica para os resíduos de construção e demolição que devido à sua importância careciam de um complemento à legislação em vigor, Decreto-Lei 178/2006 (exposto anteriormente). Na génese do Decreto-Lei 46/2008 estão em causa três premissas fundamentais, inerentes às obras de construção civil:

- características quantitativas – os RCD's constituem uma fracção significativa dos resíduos produzidos;
- características qualitativas – o fluxo de resíduos possui uma constituição heterogénea com fracções de dimensões variadas e diferentes níveis de perigosidade;
- dispersão geográfica e carácter temporário das obras – a actividade de construção civil apresenta em si própria algumas especificidades, que dificultam o controlo e a fiscalização ambiental das empresas do sector.

O intuito desta legislação inclui a criação de condições legais para a correcta gestão dos RCD's que privilegiem a prevenção da produção, o recurso à triagem na origem e a outras formas de valorização. De igual forma, o estabelecimento de critérios de qualidade que induzam a confiança dos potenciais consumidores permitindo-lhes ultrapassar barreiras psicológicas, técnicas e de informação à incorporação de resíduos reciclados na produção de novos produtos, incentivando à penetração destes novos produtos nas trocas comerciais nacionais. Neste sentido, para potenciar a melhoria de qualidade dos produtos reciclados, prevê-se a obrigatoriedade de uma metodologia de triagem, ou em alternativa, o encaminhamento para operador de gestão licenciado para realizar essa operação, sendo ainda definidos requisitos técnicos para as instalações de triagem e fragmentação. Foi também definida uma nova taxa de gestão de resíduos específica para inertes de RCD's, para permitir a reutilização dos mesmos e para que estes possam constituir concorrência face aos agregados resultantes da actividade extractiva.

Destacam-se de seguida, alguns artigos do Decreto-Lei 46/2008 e respectivo conteúdo que se entendeu possuírem informação relevante, digna de ser enfatizada:

- Artigo 5º – Prevê a minimização da produção e perigosidade dos resíduos, a maximização da valorização e a **adopção de métodos construtivos que facilitem a demolição orientada** para a aplicação dos princípios da prevenção e redução e da hierarquia das operações de gestão de resíduos;
- Artigo 7º – A utilização de RCD's em obra deve observar as normas técnicas nacionais e comunitárias aplicáveis e na ausência destas, devem ser seguidas as especificações técnicas definidas pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil;
- Artigo 10º – O novo Código da Contratação Pública, exige para as obras públicas, a elaboração de um plano de prevenção e gestão de RCD's que acompanhe o projecto de execução, cujo cumprimento, demonstrado através de vistoria, é condição de recepção da obra;
- Artigo 11º – Nas obras particulares, dispõe o Regime Jurídico de Urbanização e Edificação, que o produtor está obrigado ao cumprimento do regime legal da gestão de RCD's na execução das obras de urbanização ou nas obras de edificação;
- Artigo 16º – O operador de gestão de RCD's envia ao produtor, no prazo máximo de 30 dias, um certificado de recepção dos resíduos recebidos na sua instalação, devendo ser disponibilizada cópia do mesmo às autoridades de fiscalização, sempre que solicitado.

Ao abandonarem as obras, os resíduos devem ser acompanhados por um documento identificativo do(s) produtor(es), da sua classificação segundo a Lista Europeia de Resíduos e da sua quantidade aproximada, regendo-se pelos modelos presentes na portaria 417/2008.

Em tudo o que não estiver especialmente regulado no decreto-lei mencionado anteriormente, em matéria de gestão de RCD's, aplica-se subsidiariamente o Decreto -Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro, que institui o Regime Geral de Gestão de Resíduos [9].

Este novo decreto-lei, entrou em vigor em Junho de 2008 e espera-se que, com este, ocorra uma transformação das mentalidades, no sentido de promover a sustentabilidade ambiental das actividades de construção civil aplicáveis a uma lógica de ciclo de vida.

2.5. TRATAMENTO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

2.5.1. PROCESSAMENTO *IN SITU* OU EM CENTRAL

O processamento dos resíduos de construção e demolição, deve permitir a obtenção de materiais que satisfaçam tanto as exigências técnicas, como as exigências ambientais para a aplicação prevista [10]. As centrais de reciclagem podem ser de separação/triagem ou de trituração, podendo ambos os tipos ser móveis ou fixos [6]. O processamento dos resíduos de construção e demolição inclui geralmente quatro operações principais, a triagem, a redução primária, a britagem e a peneiração. A operação de triagem serve para remover os componentes indesejáveis presentes nos resíduos e que podem ser considerados contaminantes ou impurezas (gesso, plásticos, borrachas, madeiras, cartão, papel, metais e matéria orgânica). Na operação de redução primária, os resíduos sofrem uma diminuição de tamanho e procede-se à remoção dos materiais metálicos ainda existentes. A britagem, pode desenvolver-se em duas fases nas quais se continua a reduzir o tamanho dos resíduos e é no final desta operação que se obtêm os **agregados reciclados**. A opção por efectuar a fragmentação e selecção no próprio local de demolição ou em central depende de alguns factores, entre os quais se destacam:

- a quantidade de RCD's expectável de se produzir;
- a capacidade técnica e a disponibilidade das máquinas;
- a qualidade requerida para os agregados, em função do seu destino final;

- o espaço e tempo disponíveis no local da demolição;
- a distância entre o local de demolição e a central mais próxima e/ou aterros.

Se o processamento ocorrer no local de origem (figura 9) e o destino final dos agregados for a utilização na nova construção, os custos de transporte serão significativamente reduzidos. No entanto, por uma questão de transporte de maior quantidade de RCD's poderá, de igual forma, fazer sentido efectuar o processamento no local. A grande vantagem associada ao processamento em central fixa de reciclagem (figura 10) prende-se com o maior controlo de todo o processo, nomeadamente, na qualidade final do agregado, reduzindo ao mínimo as quantidades de componentes indesejados, tais como, a madeira e os plásticos. Neste facto, reside toda a desconfiança de mercado associada à utilização de agregados reciclados. Mesmo nos países em que esta é uma prática comum, a grande barreira à aceitação de mercado, parece serem as dúvidas que os possíveis compradores têm quanto à sua qualidade e propriedades.



Fig.9 – Processamento de RCD's em central móvel [11]



Fig.10 – Processamento de RCD's em central fixa [11]

Em geral, uma melhor gestão do processo induz uma melhor qualidade do produto final agregado reciclado. Para se poderem utilizar os agregados reciclados em distintas aplicações, é útil proceder-se à sua peneiração para se obterem as várias granulometrias desejadas (figuras 11 e 12) e garantir a uniformidade de dimensões em cada classe granulométrica [10].



Fig.11 e 12 – Exemplo de separação granulométrica de agregados reciclados [2]

Na figura 13, apresenta-se um esquema possível de tratamento de resíduos em central fixa de reciclagem.

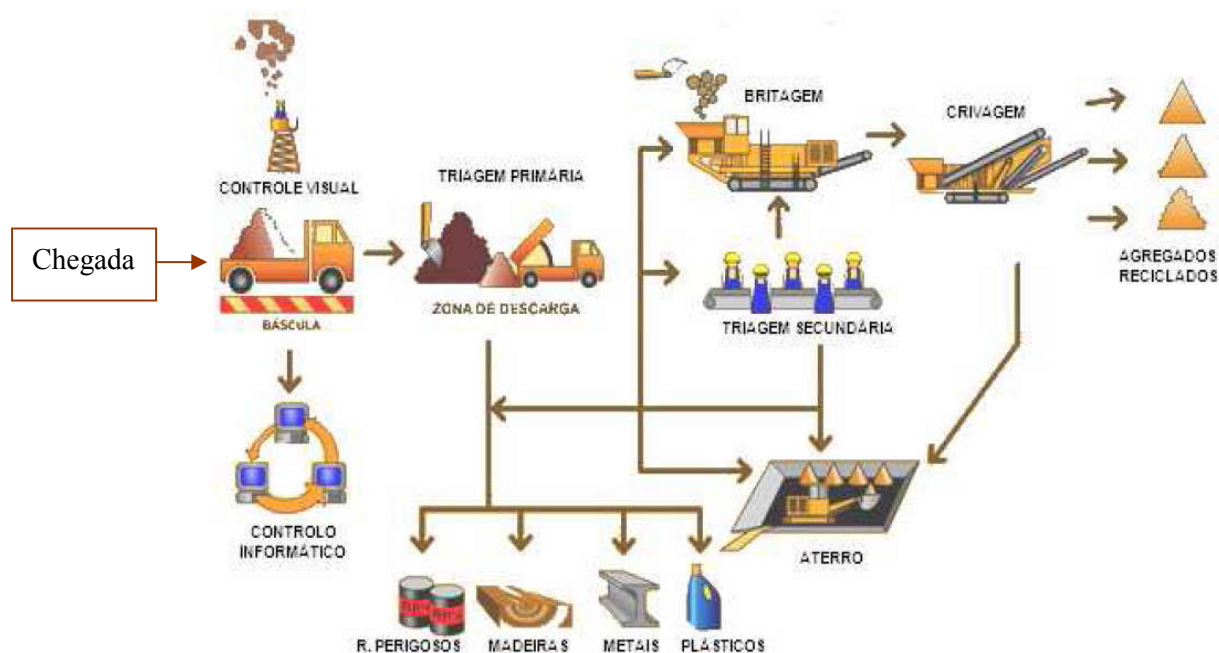


Fig.13 – Esquema de processamento de RCD's em central fixa de reciclagem [11]

Como referido anteriormente, uma das vantagens associadas à utilização de agregados reciclados, à semelhança do que ocorre nos inertes naturais, é que o material resultante dos processos de britagem, após peneiração, pode possuir as granulometrias que se desejar, consoante o destino final pretendido para os agregados. Neste sentido, o aspecto final dos agregados reciclados pode ser obtido como uma “receita” em que se fazem variar o tamanho e a cor. Estas propriedades, quando o seu destino final não é a incorporação em novas amassaduras com ou sem requisitos estruturais, mas sim na decoração de espaços públicos ou de jardins privados, pode ser uma mais valia para estes agregados, sendo um mercado potencial a explorar. Na figura 14, podem visualizar-se os vários aspectos finais dos agregados reciclados.

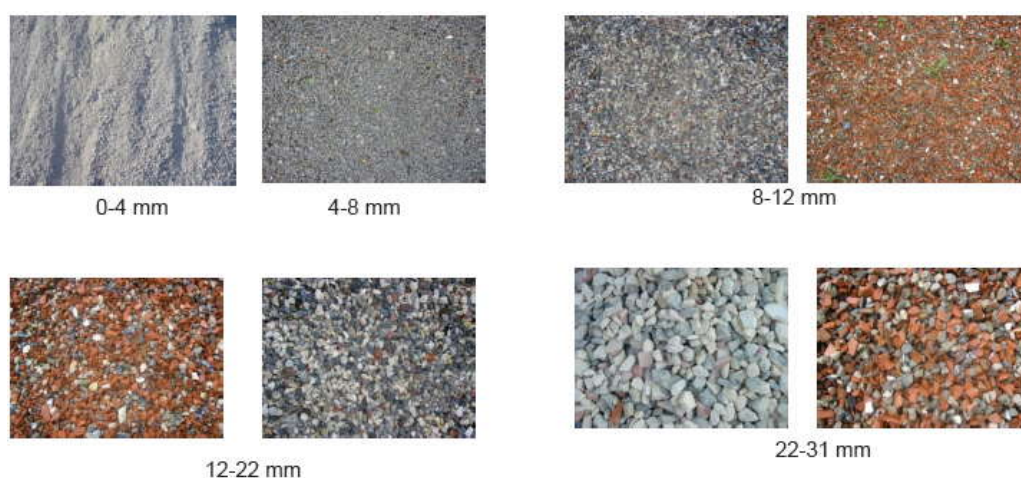


Fig.14 – Aspecto final de composições de misturas de agregados reciclados [12]

2.6. IMPACTES AMBIENTAIS ASSOCIADOS À PRODUÇÃO DE AGREGADOS NATURAIS E RECICLADOS

Sendo um dos objectivos principais da gestão dos resíduos a protecção das matérias-primas naturais, a extracção e processamento destas implica a geração de impactes ambientais, ainda que, circunscritos ao local da pedreira. No entanto, a proliferação destes impactes concretiza-se através do transporte destes até ao utilizador final, tais como, ruído, poeiras, vibrações, entre outros. Alguns dos principais impactes gerados pela extracção e processamento de agregados naturais são seguidamente enumerados [4]:

- ruído e poeiras;
- poluição do ar (resultante das explosões e das combustões dos motores);
- vibrações (resultantes das explosões, que podem provocar diaclases nos maciços rochosos e consequentemente alterar os cursos de águas pluviais e permitir a penetração de poluição);
- potencial de poluição da superfície e dos solos adjacentes, devido à utilização de óleos e lubrificantes da maquinaria inerente;
- impactes visuais;
- alteração da forma original do terreno;
- alterações dos habitats naturais e possível destruição de vestígios históricos.

Torna-se perceptível que, se os agregados reciclados forem preteridos relativamente aos naturais, não restará outro destino para estes senão o depósito em aterro, ou seja, um segundo impacte causado pela preferência de agregados naturais será o depósito adicional por estes provocado. Ainda que não seja possível a substituição total da actividade produtora pela actividade recicladora, todos os incrementos, mesmo que diminutos, verificados nesta última, serão passos em frente na direcção do crescimento sustentado [6].

A reciclagem de RCD's é, de igual forma, uma actividade geradora de impactes ambientais muito semelhantes aos da extracção, mas resultando do funcionamento da central móvel ou fixa. Relativamente aos impactes gerados pelo transporte de agregados reciclados, também estes são semelhantes aos anteriores, com a excepção da sua possível reciclagem no local de origem. Anteriormente, foram referidos alguns impactes associados à reciclagem da fracção inerte, no entanto, os RCD's são constituídos por outros constituintes não inertes cujo destino mais provável é o depósito ou a incineração, particularmente para os materiais perigosos. Relativamente aos resíduos não inertes, tais como as tintas e os plásticos, ou outros, que se encontram em pequenas quantidades misturados com a fracção inerte, apesar de não serem considerados materiais perigosos, devem ser separados, senão não será possível tratar a fracção inerte como tal.

2.7. O PAPEL DOS AGENTES ECONÓMICOS [4]

Em qualquer estudo económico procuram-se identificar os custos de produção associados a um determinado material. Quando o material em questão é um bem da natureza e por isso com capacidade esgotável, constituindo um recurso finito, ou com um ciclo de reposição muito superior à vida humana, há determinados custos imensuráveis que não são tomados em consideração devido à enorme dificuldade em quantificá-los. Desta forma, no presente trabalho apenas se referem custos que possam ser transformados em unidades monetárias e que não consideram as externalidades ambientais anteriormente referidas, sendo dado especial ênfase ao processo de decisão dos agentes económicos envolvidos.

Todo o processo económico associado à reciclagem, depende de duas decisões chave sem as quais não faz sentido este estudo:

- A decisão dos gestores de demolição de efectuarem demolição selectiva dos RCD's para tratamento individual, ou em vez disso, enviar os resíduos para depósito em aterro;
- A decisão dos potenciais compradores de agregados para a construção, para usarem agregados primários (naturais) ou agregados derivados de RCD's (reciclados).

Se as opções anteriores não forem encaminhadas para a reciclagem, todo o processo fica inviabilizado à nascença. No entanto, será de realçar que os produtos resultantes da reciclagem só poderão constituir uma alternativa aos produtos naturais se forem competitivos na relação custo/qualidade. Esta competição tornar-se-ia mais favorável aos produtos reciclados em zonas onde haja escassez de recursos naturais ou a existência de barreiras muito rígidas à deposição em aterro, o que ainda não constitui realidade em Portugal [13]. Em Portugal, ainda existe, e assim parecerá continuar a existir se não houver intervenção política (como a obrigatoriedade de reciclar ou o estabelecimento de taxas de reciclagem obrigatórias), a preferência por agregados naturais cujo custo é bastante inferior ao dos agregados reciclados, devido aos custos do processo de transformação destes últimos, constituindo um dos maiores entraves à sua penetração no mercado, originando desta forma uma competição desigual. No contexto europeu, a separação dos materiais RCD's e consequente tratamento em vez do depósito, nem em todos os países membros da União Europeia é um requisito legal. Por isso, deve-se ter consciência, que não é um assunto aberto para todos os países de forma idêntica.

2.7.1. A ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO

Tem-se plena consciência de que o emprego de agregados reciclados por parte dos industriais de construção pode resultar apenas do interesse em tornar a sua proposta mais atraente do ponto de vista ecológico, para ganharem concursos, enquanto outros podem realmente utilizá-los porque acreditam que ambos são capazes de satisfazer as suas necessidades (com algumas ressalvas relativamente aos agregados reciclados). No entanto, a compra de agregados reciclados em vez de agregados primários, apenas constituirá uma hipótese racional por parte dos industriais de construção, considerando apenas a situação de compra directa de agregados à pedreira ou à central de reciclagem sem a intervenção de intermediários, quando a seguinte inequação for satisfeita:

$$Qp + Tq \geq Er + RCDp + Tr \quad (1)$$

A inequação anterior, não inclui os custos relacionados com a minimização dos impactes ambientais. Em que cada símbolo representa um custo, nomeadamente:

- Qp - representa o preço dos agregados naturais à saída da central de exploração, vulgarmente designada por pedreira, incluindo os custos de minimização de impactes ambientais associados ao processo;
- Tq - representa o custo de transporte desde a pedreira até ao local da obra;
- Er - representa os custos adicionais associados à utilização de materiais reciclados de RCD's;
- $RCDp$ - representa o preço do material reciclado à saída da central de reciclagem, incluindo os custos de minimização de impactes ambientais associados ao processo;
- Tr - representa o custo de transporte desde a central de reciclagem até ao local da obra.

Os termos da inequação anterior podem ser avaliados economicamente da seguinte forma:

- Qp - pode-se assumir que é comandado por forças de mercado; no entanto, a curto prazo, este termo será maioritariamente dependente das opções individuais dos industriais de

construção; se as suas escolhas forem favoráveis à reciclagem, haverá uma maior penetração no mercado dos agregados derivados de RCD's e consequentemente, um aumento do consumo destes produtos; desta forma, será exercida uma pressão sobre o preço dos agregados naturais, tendencialmente para os forçar a baixar;

- Tq e Tr - dependerão naturalmente da distância a percorrer desde as respectivas centrais de produção até à obra; não há razão aparente para considerar que estes valores serão significativamente diferentes, a não ser que na obra esteja instalada uma central de reciclagem móvel a produzir directamente os agregados derivados de RCD's, anulando o custo de Tr; à partida estes valores serão relativamente próximos, visto que, em cidades de grande densidade populacional, tanto as pedreiras como as centrais de reciclagem estarão localizadas na sua envolvente; a tendência actual é para os RCD's percorrerem maiores distâncias até aos aterros, visto a sua localização ser forçada a afastar-se das populações;
- Er – representará os custos adicionais que resultam da opção por agregados reciclados, nomeadamente, alguns custos de provável armazenamento de material e alguns custos associados a tarefas de limpeza no local de aplicação dos agregados, derivados da necessidade de manter os lotes de material armazenado separados e das operações de funcionamento das máquinas entre os mesmos; quando se tiver como objectivo a produção de betão reciclado, surgem outros custos respeitantes à necessidade de pré-saturar os agregados reciclados (praticamente desprezáveis) antes de os adicionar à misturadora e à possível utilização de adjuvantes redutores de água.

Se a pretensão para utilizar agregados reciclados for com o objectivo de substituir parcial ou totalmente a fracção natural na produção de betões reciclados, deve ter-se presente que os dois tipos de agregados não oferecem equivalentes vantagens técnicas. Porém, no capítulo 3, esta temática será aprofundadamente desenvolvida. Pode-se neste ponto salientar, que as diferenças de propriedades mecânicas, físicas e químicas dos agregados reciclados, obrigam à utilização de maior quantidade de cimento e água. Por isso, ao decidir, o industrial de construção deve estar consciente que terá de ajustar as quantidades de materiais para poder tornar os betões resultantes comparáveis. No entanto, a decisão chave de utilizar agregados reciclados em nada depende desta diferença, validando a análise anterior de todo o processo de decisão.

2.8. POSSÍVEIS MEDIDAS A UTILIZAR PARA PROMOÇÃO DA REUTILIZAÇÃO E RECICLAGEM DE RCD's

Algumas das medidas utilizadas nos diferentes estados membros da União Europeia, ao longo dos últimos anos, para a promoção do reaproveitamento dos RCD's são seguidamente identificadas incluindo medidas incentivadoras, bem como, medidas restritivas [4]:

- restrições ou barreiras ao depósito de alguns elementos dos RCD's;
- mono-aterros, ou armazenamento de algumas fracções de RCD's para posterior tratamento;
- utilização de planos de controlo ambiental;
- utilização de medidas fiscais punitivas, como, taxas para depósito ou para agregados naturais;
- utilização de medidas fiscais positivas, como, subsídios;
- utilização de medidas positivas como a implementação de planos de gestão de resíduos;
- suporte financeiro de apoio à pesquisa e desenvolvimento de projectos;
- suporte financeiro de apoio a projectos piloto de demonstração;

- utilização de Acordos Voluntários entre entidades privadas e públicas;
- fornecimento de educação e suporte prático, orientados especificamente para os RCD's;
- disponibilização de serviços de informação e aconselhamento, orientados para os RCD's;
- existência de “trocas de resíduos”, maioritariamente através da Internet;
- disponibilização de normas aplicáveis à reutilização de RCD's;
- disponibilização de meios para a reciclagem, tais como, centrais fixas e equipamentos.

Será de salientar, que para algumas medidas se tornarem efectivas, é necessário que actuem em paralelo com outras medidas, ou seja, uma medida por si só não pode operar sozinha para se obterem bons resultados. Um exemplo deste facto, é o que ainda se passa em Portugal, em que o custo de agregados naturais é muito inferior ao dos agregados reciclados. Por isso, não adianta criar condições para desenvolver os processos de reciclagem, se posteriormente não se conseguirem comercializar os agregados reciclados. Em Portugal, os custos de deposição legal representam actualmente uma parcela considerável, principalmente para volumes de resíduos indiferenciados, no entanto, ainda não são elevados o suficiente para desmotivar a sua utilização. Um outro aspecto que não favorece a reciclagem, é o facto da deposição ilegal não ser devidamente controlada.

A aplicação de taxas para depósito em aterro, ou para agregados naturais, não constituirá uma medida que contribua para elevados níveis de reciclagem, porque o valor da taxa a implementar teria de ser estabelecida a níveis políticos, antes de ocorrer a alteração dos comportamentos dos engenheiros, empreiteiros e dos agentes demolidores, em zonas com fácil acesso aos aterros ou às pedreiras. No entanto, variando o valor da taxa de forma a corresponder às circunstâncias locais, poderia gerar consideráveis distorções ao comércio e suscitar a procura de agregados naturais em zonas cujo custo seja inferior. Conclui-se, desta forma, que os custos de deposição em aterro são um factor que influencia significativamente a opção de reciclar. A forma como esses custos são estabelecidos não é particularmente relevante, mas o potencial lucro dado aos agentes demolidores, deve ser incentivador o suficiente para que estes separem os diferentes tipos de resíduos e que reciclem a maior quantidade possível. Num país como Portugal, em que a gestão dos resíduos ainda não ocupa um lugar de destaque na sociedade, a implementação de uma taxa para depósito em aterro apenas iria contribuir significativamente para o aumento do volume de resíduos depositado ilegalmente.

Para se atingirem elevados níveis de reciclagem, será necessário estabelecer um conjunto de quatro condições, seguidamente enumeradas, sem as quais todo o processo ficará inviabilizado:

- os aterros devem ser bem geridos e o depósito ilegal deve ser pouco comum e sujeito a sanções;
- o detentor de RCD's deve enfrentar custos elevados de depósito em aterro de materiais perigosos ou de resíduos misturados (de forma a evitar a contaminação e desincentivar a mistura);
- deve existir a oportunidade de tratamento da fracção inerte (fragmentação e selecção) com vista à sua reutilização e reciclagem;
- deve existir aceitabilidade por parte dos utilizadores de inertes naturais, para a substituição parcial destes por inertes reciclados, combatendo a sua discriminação.

Das premissas anteriores, reportando-as para a realidade portuguesa, observa-se que em Portugal só recentemente se começou a prestar verdadeira atenção a estes resíduos, principalmente com a recente publicação da nova lei específica para RCD's. Verifica-se por todo o país, que os meios de detecção e sancionamento dos depósitos ilegais são ainda ineficazes, originando a proliferação da deposição dos resíduos nos sítios mais inóspitos e inimagináveis, sendo as zonas verdes com fraca densidade

populacional um dos locais mais fustigados, como são exemplo os despejos das figuras 15 e 16 seguidamente apresentadas.



Fig.15 e 16 – Exemplos de despejos de RCD's em zonas verdes [14]

Verifica-se ainda que, nos países com elevadas taxas de reciclagem, existem legislação e fiscalização eficazes, bem como vontade política e controlo de qualidade apertado. Da análise da conjuntura actual, pode concluir-se então o seguinte [6]:

- existe tecnologia adequada;
- a reciclagem e a reutilização são já uma realidade e um objectivo na Europa;
- é necessário existirem objectivos e vontade política para reciclar mais, em Portugal.

A acção dos governantes é primordial para facilitar a reutilização dos resíduos das demolições, e deverá incidir sobre [6]:

- a formulação de metas políticas e objectivos nacionais, em termos de percentagens obrigatórias de reciclagem;
- a implementação de legislação e sistemas de fiscalização apropriados;
- a intervenção nos preços, através da criação de taxas ambientais para o poluidor e de subsídios para o reciclador;
- a elaboração de normas nacionais sobre as actividades produtoras e recicladoras;
- a implementação de um sistema de controlo de qualidade sobre as actividades recicladoras.

Uma medida administrativa relativamente simples, e que poderia surtir efeitos positivos, seria o estabelecimento da obrigatoriedade de planos de demolição e planos de gestão dos resíduos daí resultantes. Esses planos seriam avaliados e aprovados pelas autoridades locais, antes de se proceder à respectiva demolição.

Um bom exemplo nacional de como a intervenção dos governantes pode realmente alterar o destino dado aos resíduos, é a atitude participativa da Câmara Municipal de Montemor-o-Novo perante a gestão dos resíduos da sua cidade. Este concelho desenvolveu o projecto REAGIR, “Reciclagem do Entulho no Âmbito da Gestão Integrada de Resíduos”. Este projecto, co-financiado pelo programa LIFE-AMBIENTE, tem como objectivo assegurar a recolha e destino adequado para os RCD's, dando prioridade à valorização e reciclagem da fracção inerte dos resíduos (figuras 17 e 18). Pretende-se, sucintamente, implementar um sistema municipal de recolha selectiva de RCD's, junto de pequenos e grandes produtores com posterior valorização controlada. Para a concretização deste projecto foi necessário definir normas locais de gestão e construir uma unidade piloto de reciclagem da fracção inerte dos RCD's, previamente separada. A aplicação dos agregados reciclados, foi efectuada na

reabilitação de vários caminhos municipais de terra batida, existindo alguma procura com o mesmo fim, por parte de privados. A aplicação destes agregados estendeu-se à produção de peças de betão não estrutural com substituição parcial na ordem de 20% [12] [15].



Fig. 17 – Esquema de recepção, descarga e triagem dos resíduos abrangidos pelo projecto REAGIR [12]



Fig. 18 – Esquema de fragmentação, crivagem e armazenamento dos agregados reciclados produzidos no âmbito do projecto REAGIR [12]

Uma outra iniciativa de âmbito multimunicipal, no sentido de implementar um Sistema Integrado de Gestão de RCD's, surgiu com o projecto CONVERTER numa Associação de Municípios do Alentejo (figura 19). Esta associação surge para tratar o conjunto dos RCD's produzidos em cada município, maximizando as quantidades enviadas para valorização e minimizando os custos unitários de gestão. Alguns dos objectivos a atingir eram a estimativa das quantidades e características qualitativas dos resíduos produzidos em cada concelho, recuperar técnica e economicamente os locais de deposição ilegal (recuperação do passivo ambiental da região), assim como, analisar a viabilidade da abertura de um Centro de Triagem e Valorização (CTV) e a instalação de Ecocentros. Uma outra medida a implementar seria a criação de uma marca de certificação que permita identificar os empreiteiros que fomentem a aplicação de boas práticas de protecção do ambiente [16].



Fig.19 – Identificação dos oito municípios envolvidos no projecto CONVERTER [16]

Este projecto culmina com a abertura de um Centro de Triagem e Valorização de RCD's, instalado numa antiga escombreira em Beja (figura 20). Numa tentativa de incentivar a demolição selectiva e respectiva triagem dos resíduos na origem, são aplicadas diferentes tarifas conforme o grau de separação dos resíduos, sendo que, os resíduos não triados podem atingir preços por tonelada até o dobro do preço dos resíduos triados [16].

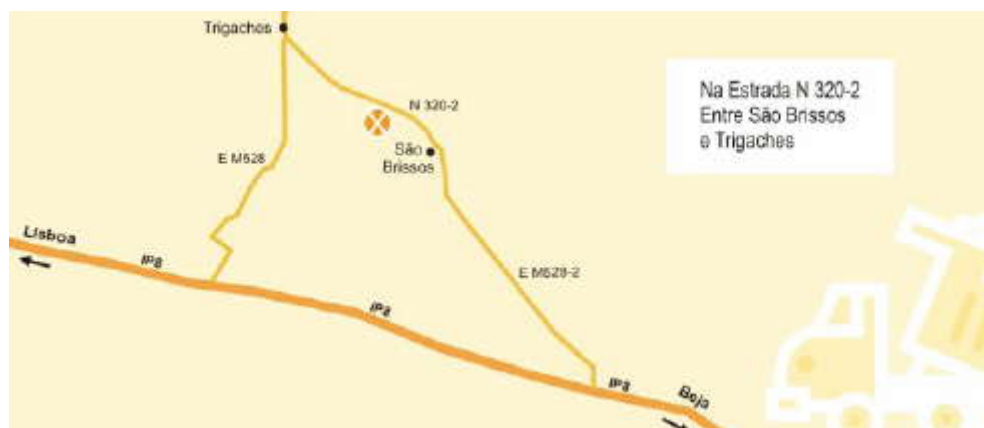


Fig.20 – Localização do novo Centro de Triagem e Valorização de RCD's do projecto CONVERTER [16]

3

PROPRIEDADES DE AGREGADOS E BETÕES RECICLADOS DE RCD's – ALGUNS CASOS DE ESTUDO

3.1. REINCORPORAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS EM NOVAS AMASSADURAS

3.1.1. INTRODUÇÃO

Das múltiplas aplicações possíveis para os agregados reciclados, como já referido, a que lhe confere maior valor técnico é a aplicação em novos betões. Com este capítulo, pretende-se dar a conhecer ao leitor qual o estado de conhecimento sobre o tema, **reincorporação de agregados reciclados em novas amassaduras**.

Dos resíduos granulares, a maioria dos seus componentes são capazes de ser valorizados e reutilizados. Estes componentes podem ser divididos em dois grupos, os materiais inertes e os não-inertes, como são exemplo as madeiras, o papel, os plásticos, o gesso e os resíduos contaminantes como o amianto. Dos materiais à base de pedra, estes podem subdividir-se em agregados de maior granulometria, de betão e de alvenaria e partículas de areia, sendo estes resíduos os que possuem capacidade para serem utilizados como materiais secundários na construção de edifícios [17]. No sentido de atribuição de maior qualidade técnica e consequentemente maiores oportunidades de mercado para os agregados reciclados de betão, é conveniente efectuar a separação destes dos elementos de alvenaria e de eventuais resíduos que possam afectar a sua qualidade. Os agregados de alvenaria, apesar da sua importância, não são alvo deste estudo, sendo no entanto de ressaltar que podem ter amplas aplicações em bases e sub-bases de pavimentos de estradas.

Desde meados dos anos setenta que as atenções começaram a focar-se no aproveitamento dos resíduos de construção e demolição, em que muitos investigadores dedicaram o seu trabalho à caracterização e inventariação das propriedades dos agregados resultantes, ao estabelecimento de requisitos mínimos para a sua utilização segura em betão e na definição das propriedades dos betões reciclados [18].

Neste capítulo, será analisada a possibilidade de utilização de agregados finos e grossos reciclados de betão, atendendo às suas características e propriedades que induzem nos novos betões, com base em estudos existentes sobre esta problemática. Relativamente a este tema, pretende-se de igual forma enfatizar, que é uma possibilidade que os potenciais produtores de betão devem ponderar e até que percentagens destes materiais podem incorporar, conforme a qualidade final dos betões a garantir. Existe actualmente uma especificação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), publicada recentemente [10], que contém já algumas indicações nesse sentido. Convém salientar, a priori, que a realidade prática associada à utilização deste tipo de betões incorpora algumas

dificuldades inerentes aos agregados reciclados, nomeadamente, a forma, a rugosidade e a quantidade de argamassa aderente.

3.1.2. TRATAMENTO DE SEPARAÇÃO

Para se obter uma melhor qualidade dos produtos finais, agregados grossos e/ou agregados finos, será necessário empregar diferentes técnicas de separação dos resíduos. O objectivo a alcançar com este tratamento será a remoção dos contaminantes com a utilização do menor número de passos ao longo do processo. Primeiramente serão removidos os contaminantes e posteriormente serão separados os resíduos em inertes e não-inertes. Dependendo do tipo de aplicação a que se destinam os resíduos, o tratamento será constituído por um maior ou menor número de passos, conforme o nível de qualidade final pretendida para os agregados, como é exemplo, o esquema representado na figura 21 [17].

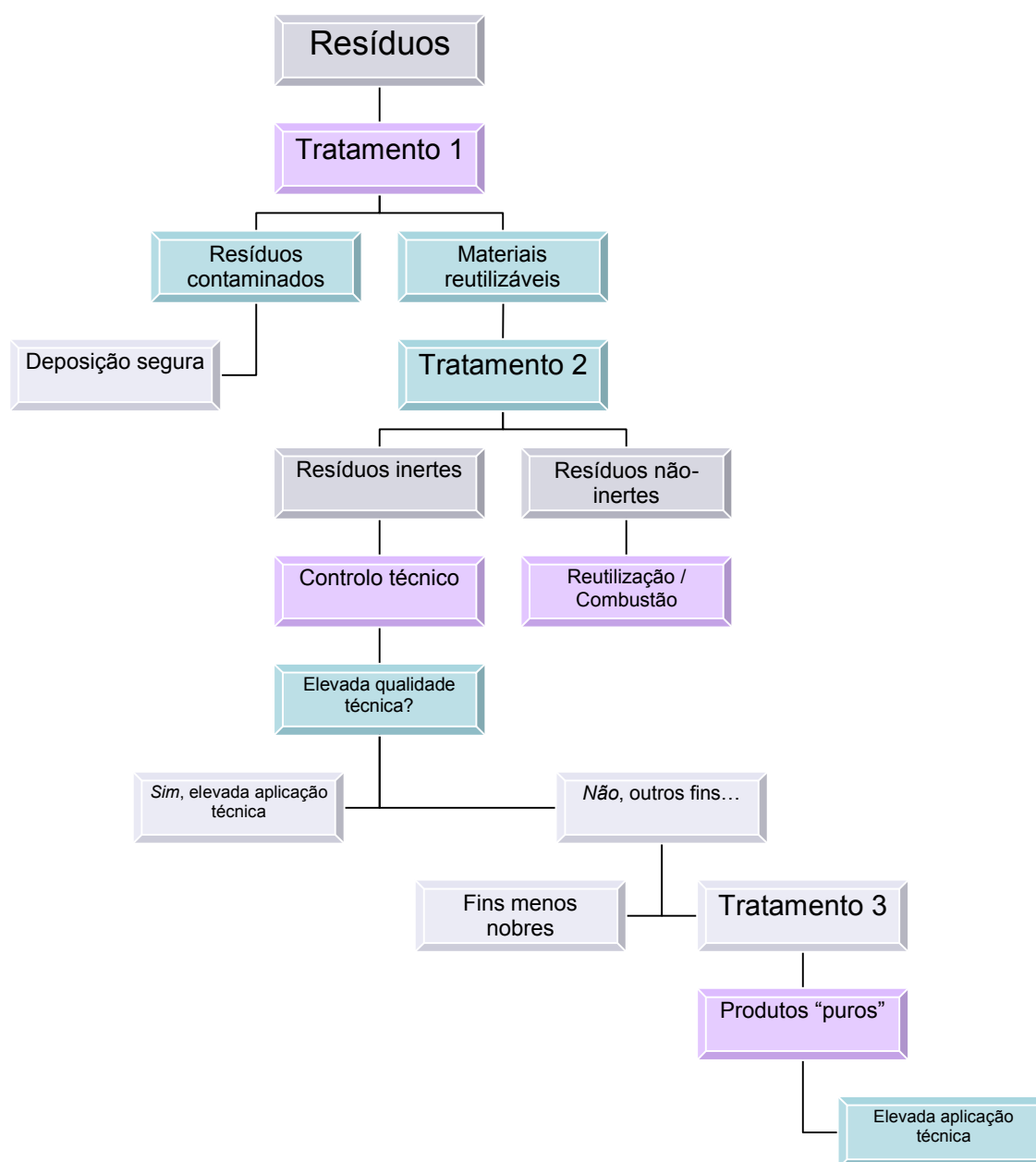


Fig.21 – Esquema sucinto de tratamento de separação de qualidade crescente [17]

3.1.3. SEPARAÇÃO DAS FRACÇÕES INERTES

A fracção inerte constitui na maioria das vezes, em obras de demolição de edifícios de betão armado, a maior percentagem dos resíduos, incluindo inertes de betão e de alvenaria, sendo estes passíveis de serem reciclados e posteriormente utilizados como agregados secundários em construções novas. Devido a esta mistura de fracções, a reutilização de RCD's está limitada a fins menos nobres, como é exemplo a aplicação destes produtos na construção de estradas ou como material de enchimento. A qualidade técnica desta mescla de agregados impede a sua utilização em produtos de betão de qualidades elevadas, porque a fracção de alvenaria afecta negativamente as propriedades mecânicas do betão. Desta forma, será necessário empregar técnicas de separação, para se poderem utilizar os agregados em aplicações individuais de maior exigência [19].

3.1.3.1. Técnicas de Separação aplicáveis aos resíduos

As propriedades mais comuns para separação de materiais são: granulometria, densidade, susceptibilidade magnética e cor. Nos dois tipos de inertes mais frequentes, de betão e de alvenaria, as diferenças mais marcantes entre si, são a densidade, a cor e a percentagem de Fe_2O_3 (óxido de ferro), como se pode constatar no quadro 1. Estes dois materiais possuem densidades diferentes, sendo os agregados de betão normalmente mais pesados que os agregados de alvenaria. Uma técnica simples para avaliar estes valores é a técnica de jigagem ou separação densitária, em que, os agregados são atravessados por uma corrente de fluido (água), imergindo com diferentes velocidades conforme a densidade do material. Como as suas cores são bastante distintas, aplicam-se técnicas de separação por cores. A percentagem de Fe_2O_3 é maior nos agregados de alvenaria do que nos agregados de betão, podendo-se considerar, que esta diferença torna os agregados de alvenaria passíveis de atracção magnética. A técnica de separação magnética consegue atingir graus de pureza na ordem dos 90% para os dois tipos de agregados [19]. Com a aplicação destas técnicas em laboratórios ou em centrais fixas, poderão utilizar-se estes dois tipos de agregados num maior número de aplicações, podendo estas ser mais exigentes, como é o caso da aplicação dos agregados de betão em novas amassaduras.

Quadro 1 – Técnicas de separação de agregados de alvenaria e de betão [19]

Propriedades	Alvenaria	Betão ou argamassa	Técnica de separação adequada
Densidade	1600 a 1800 kg/m^3	2300 a 2500 kg/m^3	Jigagem ou separação por densidades
Cor	Vermelha ou amarela	Cinzenta	Separação por cores
% Fe_2O_3	3 a 4%	0 a 1%	Separação magnética

Para a melhoria da qualidade final dos produtos, é fundamental atender às características do produto de origem do processo de tratamento, ou seja, os resíduos provenientes das demolições. Nesse sentido, adoptar um método de demolição selectiva poderá contribuir para o sucesso do tratamento efectuado a jusante.

3.1.4. PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS DE BETÃO

Os agregados reciclados, diferem dos agregados naturais na sua composição, ou seja, são constituídos por fracção natural e por fracção artificial de “argamassa” aderente, como se pode visualizar nas figuras 22 e 23. As suas propriedades são então primeiramente influenciadas pela qualidade dos inertes naturais e da argamassa de amassadura, e posteriormente, após britagem, pela argamassa

aderente. As propriedades destes agregados, vulgarmente tidas como “negativas” devem a sua génese maioritariamente à matriz cimentícia aderente à sua superfície, resultante dos processos de demolição e posterior britagem, assim como, ao tipo de betão que lhes deu origem. Esta argamassa aderente, é responsável pelo aumento da absorção de água e pela diminuição da densidade dos agregados reciclados (devido ao aumento da porosidade do material), assim como, pelo aumento dos valores de perda por fragmentação (provenientes do ensaio de Los Angeles) e do teor em sulfatos, comparativamente com os agregados naturais [20] [21]. Este tipo de agregados, devido à sua estrutura muito porosa, para além de apresentarem uma maior percentagem de absorção de água, este embebedimento é muito prolongado no tempo [22]. A porosidade dos agregados reciclados, influenciada negativamente pela argamassa aderente, é um dos factores que poderá provocar um decréscimo da resistência do betão, visto que o comportamento mecânico destes agregados é de igual forma comandado pela resistência da camada de argamassa [23].



Fig.22 e 23 – Agregados grossos reciclados de betão [11] [21]

Os principais factores que influenciam a quantidade de argamassa aderente aos agregados, quando britados com o mesmo equipamento, são: a relação água/cimento do betão original, a resistência do betão de origem e o tamanho do agregado britado. O processo de britagem e o tipo de britadeira utilizada têm influência na quantidade de argamassa aderente e na qualidade dos agregados reciclados, nomeadamente, a forma destes agregados pode variar, no entanto, na generalidade dos casos, aproxima-se da laminar angulosa apresentando texturas mais ou menos rugosas em função da argamassa remanescente na sua superfície, afectando as condições de trabalhabilidade dos novos betões ou argamassas. A razão água/cimento do betão original, tem influência na qualidade da argamassa de amassadura e consequentemente na ligação/aderência da argamassa aos agregados, quando o betão de origem é britado com o mesmo equipamento e usada a mesma energia no processo. A resistência deste betão é de igual forma um factor de entropia, na medida em que a quantidade de argamassa aderente é proporcional à resistência do betão, ou seja, betões de menores resistências originam agregados com menor quantidade de argamassa aderente, quando o betão de origem é britado com o mesmo equipamento e usada a mesma energia no processo [18]. Como referido mais à frente neste trabalho, a quantidade de argamassa aderente aumenta, com a diminuição do tamanho dos agregados reciclados.

Um estudo realizado em Espanha [21] para identificar a influência do teor de argamassa aderente nas propriedades dos betões com incorporação de agregados reciclados, teve como objectivo estabelecer os requisitos a que devem respeitar os agregados reciclados para produção de novas amassaduras de betão com fins estruturais. Neste estudo foram recolhidas amostras de um centro de tratamento de resíduos em Madrid, as quais foram separadas em fracções granulométricas, tendo sido utilizadas para experimentação as fracções 4/8 e 8/16 mm, para se aferir sobre a influência do tamanho dos agregados

na qualidade final dos mesmos. Apresentam-se seguidamente, um sumário dos resultados obtidos e das principais conclusões retiradas deste [21] e de outros estudos similares, referidos no documento.

- **Teor de argamassa aderente** – o teor de argamassa aderente, é maior nas fracções mais finas 4/8 mm, na ordem de 30 a 50%, e menor nas fracções mais grossas 8/16 mm, no intervalo entre 33 e 55%, podendo-se concluir que as propriedades ditas “negativas” são mais marcadas nos agregados finos;
- **Densidade** – as densidades obtidas variam entre 2.010 kg/m³ e 2.300 kg/m³ para a fracção 4/8 mm e entre 2.100 kg/m³ e 2.400 kg/m³ para a fracção 8/16 mm. A densidade é tanto menor, quanto maior for o teor de argamassa.
- **Absorção de água** – este parâmetro apresentou valores entre 5,1% e 11,5% para a fracção mais fina e valores compreendidos no intervalo entre 4,2% e 8,8% para a fracção mais grossa. O crescimento da absorção de água, é directamente proporcional à quantidade de argamassa aderente, particularmente na fracção mais fina. De salientar, que este parâmetro é de igual forma influenciado pela qualidade da argamassa de amassadura e é responsável pela resistência aos ciclos de gelo/degelo das novas amassaduras de betão [22]. No entanto, é consensual que a absorção de água não é influenciada pela resistência do betão original [18].
- **Fragmentação de Los Angeles** – a perda por fragmentação obtida pelo ensaio de Los Angeles permitiu obter valores na gama de variação entre 35% a 42%. Através deste ensaio, uma grande parte da argamassa aderente é removida, logo quanto maior for a perda por abrasão, maior era a quantidade de argamassa fixada aos agregados. Este parâmetro é influenciado, não só pela quantidade de argamassa aderente, mas também pela resistência do betão original, pela qualidade dos agregados naturais e ainda pela forma de britagem a que foi sujeito o betão de origem. Quanto menor for a resistência do betão original, maior é a perda por fragmentação de Los Angeles, devido à consequente menor resistência da argamassa aderente [18].
- **Reacção alcalis-agregado** - esta reacção é influenciada pelo teor de alcalis existente no cimento que deu origem à argamassa, aumentando com o aumento da percentagem desta, assim como, se deve à grande dificuldade em determinar precisamente a reactividade dos agregados [24];
- **Reacção alcalis-silica** – com excepção dos agregados provenientes da regularização de pavimentos, os agregados reciclados podem ser considerados não-reactivos, mesmo quando provenientes de betões fabricados com agregados reactivos [10].
- **Contaminantes [18]** – a presença de materiais considerados contaminantes, juntamente com os agregados, podem influenciar negativamente a resistência e a durabilidade dos betões com estes produzidos, devendo o seu teor ser limitado;
- **Teor em cloretos [18]** – a presença de cloretos nos agregados deve ser severamente limitada, de forma a prevenir a corrosão das armaduras, no entanto, a concentração de cloretos abaixo da qual não há corrosão, não é ainda consensual;
- **Teor em sulfatos** – este factor é influenciado pelo teor de sulfatos existentes no cimento que deu origem à argamassa, aumentando com o aumento da percentagem desta.

São estas propriedades, entre outras, que irão determinar o desempenho e a durabilidade dos betões com eles produzidos, agravando as suas características com o aumento da percentagem de substituição.

3.1.5. MELHORAR A QUALIDADE DOS AGREGADOS RECICLADOS – RECOMENDAÇÕES [21]

Uma forma de diminuir o conteúdo da “argamassa aderente” seria a realização de vários processos de esmagamento, obrigando a “argamassa” a soltar-se, permitindo obter agregados mais “puros”. No entanto, este tipo de tratamento seria mais demorado e mais dispendioso, sendo só aplicável quando se pretende obter grande qualidade final para os agregados, remanescendo a questão do que fazer à grande quantidade de “argamassa” resultante desse processo. Porém, outros critérios são propostos como a limitação do tamanho dos agregados a utilizar, visto que, as propriedades se agravam com a diminuição do tamanho. De igual forma, sugere-se a limitação da qualidade do betão original, no sentido de assegurar a melhor qualidade dos agregados resultantes. Para possível utilização destes agregados em betão estrutural, podem ser estabelecidos requisitos mínimos quanto à qualidade do betão original, em que, a título de exemplo, a vizinha Espanha propõe o valor de 25 MPa [21] como critério de rejeição/selecção.

No sentido de seleccionar agregados de melhor qualidade para produção de betão estrutural, fixar um valor máximo para o coeficiente de absorção de água parece ser uma boa proposta, na medida, em que este parâmetro de certa forma se relaciona com os restantes. O coeficiente de absorção de água aparenta apresentar uma boa correlação com a densidade dos agregados [25], sendo que para maiores taxas de absorção correspondem menores valores de densidade. As maiores taxas de absorção de água estão também relacionadas com os agregados cujo betão original tinha baixa resistência à compressão, com os agregados que apresentavam maiores perdas por fragmentação de Los Angeles e ainda, com os agregados que apresentavam maiores valores do teor de partículas leves [25]. Como referido anteriormente, o maior responsável pelos elevados valores do coeficiente de absorção de água é a argamassa aderente, influenciando negativamente as outras propriedades. Relativamente à absorção de água por parte dos agregados reciclados durante o processo de amassadura, uma forma de a evitar será a utilização de agregados molhados ou pré-saturados para manter uma qualidade uniforme durante o processo de produção, no entanto, parece não haver consenso no meio científico, no que respeita ao tempo, no fim do qual se encontra findo o processo de pré-saturação dos agregados. Nesse sentido, visto que o controlo da absorção de água é um aspecto crítico que influencia a qualidade do betão reciclado, é necessário que sejam criados ensaios para avaliar o tempo de absorção até à saturação, realizados regularmente, para se obter uma caracterização laboratorial das amostras recolhidas in situ.

3.2. PRODUÇÃO DE BETÃO COM AGREGADOS RECICLADOS

3.2.1. PRODUÇÃO EM CENTRAL DE BETÃO PRONTO

Através da chamada de atenção anterior para as vicissitudes relacionadas com a selecção dos agregados reciclados, torna-se evidente que determinados cuidados não são apropriados ao ambiente de produção de betão estrutural em obra. Para transformar numa realidade prática a incorporação de agregados reciclados na produção de betão estrutural com qualidade, resta a modalidade do fornecimento de betão previamente confeccionado, vulgarmente conhecido como betão pronto, onde o seu fabrico poderá estar sujeito a todos os critérios de controlo e monitorização. Desta forma, surgem novos requisitos para as centrais de produção de betão pronto [24]:

- existência de silos separados para agregados reciclados;
- quando as misturas forem realizadas com agregados pré-saturados, os stocks de agregados devem dispor de aspersores de água para se poderem manter as condições de humidade próximas da saturação;

- os equipamentos de mistura devem estar ajustados em termos de tempo e velocidade, de forma a não produzir finos resultantes da argamassa aderente, por fricção com outros agregados durante o processo de amassadura;
- nas substituições parciais por peso, como os agregados reciclados possuem menores densidades, logo são mais leves, para se atingir um peso igual ao dos agregados naturais será necessário um maior volume de agregados reciclados e consequentemente maiores percentagens em volume destes agregados nas novas amassaduras.

Após a produção em central, os betões reciclados estão aptos a serem transportados, colocados e compactados exactamente da mesma forma que os betões normais [18].

3.2.2. ADERÊNCIA DA NOVA ZONA DE INTERFACE [18]

Como referido anteriormente, os agregados reciclados possuem menores valores de densidade e maior capacidade de absorção de água, devido à presença da argamassa aderente. A zona de interface previamente existente nos agregados reciclados é precisamente a ligação da argamassa aderente aos agregados originais. Surge então, uma nova zona de interface entre a argamassa aderente e a nova pasta de cimento (figura 23), que vai garantir a coesão do betão reciclado e para a qual é necessário garantir condições de aderência. Estas duas zonas devem ser tidas em consideração relativamente à permeabilidade e resistência do novo betão a produzir.

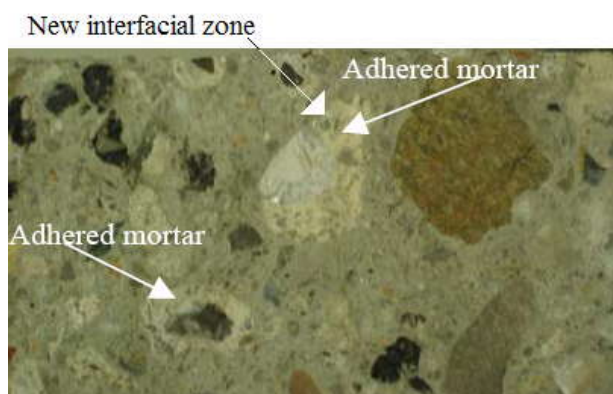


Fig.24 – Nova zona de interface em betão produzido com agregados reciclados [18]

Se o agregado natural estiver envolvido por argamassa aderente em quase toda a sua superfície, este material poderá encontrar-se sujo e com pós de britagem e a sua porosidade pode ser elevada. A capacidade de absorção desta argamassa é alta e podem surgir problemas de aderência no contacto, devidos à água de amassadura concentrada na nova zona de interface, que pode ou não potenciar esta ligação. A opção pela utilização de agregados reciclados 100% saturados, não torna efectiva a ligação argamassa existente/argamassa nova, pelo que, a humidade dos agregados reciclados deve ser próxima do limite de saturação, ou seja, cerca de 80% a 90%, permitindo a absorção de cimento para a superfície dos agregados por sucção. Doravante, sempre que for mencionado que os agregados reciclados devem encontrar-se húmidos ou pré-saturados para diminuir a sua capacidade de absorção, subentende-se que devem possuir um teor em água próximo da saturação antes de serem adicionados aos restantes materiais da nova amassadura.

3.3. BETÃO PRODUZIDO COM AGREGADOS RECICLADOS – CASOS DE ESTUDO

3.3.1. UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS FINOS RECICLADOS DE BETÃO EM NOVAS AMASSADURAS

De vários estudos realizados em todo o mundo, é consensual a aplicação de agregados grossos na produção de novo betão, visto que as propriedades dos agregados são agravadas com a diminuição da granulometria. No entanto, outros estudos foram efectuados para produção de betões com incorporação crescente de agregados finos reciclados. Dos dois estudos abordados neste trabalho, o primeiro tem como objectivos avaliar as propriedades dos novos betões, em que ao mesmo tempo tenta assegurar iguais trabalhabilidades dos mesmos, através do acerto da relação água/cimento [26], enquanto que o outro, visa apenas avaliar as propriedades dos novos betões, mantendo constante esta proporção [27].

3.3.1.1. Propriedades dos betões com igual trabalhabilidade [26] [27]

A utilização de agregados finos reciclados visa a substituição parcial/total das areias naturais. Esta substituição tem o duplo objectivo de, por um lado reduzir a extracção de material natural e por outro de reaproveitar o material remanescente da trituração de betão, evitando a sua possível deposição em aterro. No entanto, deve-se ter presente que esta substituição acarreta um aumento da quantidade de água a incorporar na amassadura devido a efeitos colaterais de aumento de absorção de água, que conduzem a mau desempenho em termos mecânicos e de durabilidade dos novos betões.

Várias composições foram estudadas incorporando sucessivamente maiores percentagens deste material (10, 20, 30, 50 e 100%) e estabelecendo em paralelo uma comparação com um betão de referência BC, em termos de resistência e durabilidade. As areias de substituição foram obtidas a partir de um betão confeccionado em laboratório de forma a conhecer e controlar as características do betão original. Este betão, por sua vez era constituído por cimento CEM II 32,5N, areia de rio, britas e água, na proporção aproximada 1: 1,7: 2: 1,3: 0,52, em peso, obtendo-se ao fim de 28 dias a resistência à compressão média de 29,6 MPa. Após britagem e peneiração, foram utilizadas as areias recicladas de dimensões compreendidas entre 0,074mm e 1,19mm. A caracterização dos agregados naturais e reciclados permitiu comparar e identificar as principais diferenças entre si, mantendo iguais os módulos de finura, evidenciadas no quadro 2.

Quadro 2 – Principais propriedades dos agregados finos [26]

Propriedades	Areias Naturais	Areias Recicladas
Peso específico das partículas secas (kg/m ³)	2544	1913
Peso específico das partículas saturadas com superfície seca (kg/m ³)	2564	2165
Absorção de água %	0,8	13,1
Módulo de Finura	2,38	2,38

Da análise do quadro, pode-se concluir que as areias recicladas possuem menor valor de densidade devido, como já referido, à argamassa aderente, o que conduz a maiores coeficientes de absorção de água. Seguidamente, fabricaram-se as diferentes amassaduras, com o objectivo de obter iguais

trabalhabilidades com classes de abaixamento S_2 , respectivamente 80 ± 10 mm, medidas com cone de Abrams. Como era expectável que a utilização destes agregados aumentasse consideravelmente a quantidade de água devido à forma angulosa dos agregados e à maior absorção destes, utilizou-se um superplastificante à base de carboxilatos, em 1,3% em peso de cimento. O acerto das relações água/cimento deve considerar que uma parte da água será absorvida pelos agregados e como tal, não estará disponível como água de amassadura. No entanto, desconhece-se o tempo que os agregados finos reciclados demoram a absorver água até atingirem a saturação. Por este motivo, foi feita uma análise com duas amassaduras distintas, com diferentes tempos de pré-saturação dos agregados, correspondendo a 10 e 20 minutos cada. A água disponível para hidratar o cimento e os restantes inertes dá origem à relação A/C efectiva. Na determinação das relações anteriores reside a dificuldade de estimar a relação A/C total. Após moldagem de cubos de 150mm, avaliou-se a resistência à compressão aos 28 dias de cura. Para a avaliação da resistência à tracção por compressão e do módulo de elasticidade foram moldados cilindros de 150mm de diâmetro e 300mm de comprimento, com 31 dias de cura até se efectuarem os ensaios. Apresentam-se de seguida, no quadro 3, as composições dos betões de comparação (BC) e dos betões reciclados BR, assim como, as respectivas resistências e módulo de elasticidade, com as incorporações das diversas percentagens de areias recicladas.

Quadro 3 – Composições dos betões e respectivos abaixamentos [26]

	BC	B10R	B20R	B30R	B50R	B100R
% de substituição	0	10	20	30	50	100
Cimento CEM I 42,5R (kg)	380	380	380	380	380	380
Água (l)	160	163	163	163	163	171
Relação A/C total	0,42	0,43	0,44	0,44	0,44	0,48
Relação A/C efectiva	0,42	0,43	0,43	0,43	0,43	0,45
Agregados Finos Naturais (kg)	664	595	529	462	330	0
Agregados Finos Reciclados (kg)	0	49	99	148	246	488
Brita 1 (kg)	407	404	404	404	404	400
Brita 2 (kg)	380	378	378	378	378	374
Brita 3 (kg)	395	393	393	393	393	388
Superplastificante (kg/m ³)	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
Abaixamento (mm)	87	105	100	90	85	79
Resistência à compressão (MPa)	59,4	62,2	58,4	61,3	60,8	61,0
Resistência à tracção (MPa)	3,85	-	-	3,65	-	2,95
Módulo de elasticidade (GPa)	35,5	-	-	34,2	-	28,9

Sumariamente, transcrevem-se as principais conclusões obtidas através dos ensaios realizados:

- a relação A/C efectiva aumenta com a percentagem de substituição, no entanto, a incorporação de agregados finos reciclados não obriga a aumentos muito significativos

desta relação A/C, para manter a trabalhabilidade, que condiciona sobretudo, a colocação dos novos betões;

- a resistência à compressão aos 28 dias, sofre pequenas variações tendo tendência para aumentar ligeiramente com o crescimento da percentagem de substituição, demonstrando alguma actividade do cimento por hidratar proveniente das areias recicladas;
- a resistência à tracção por compressão e o módulo de elasticidade, são influenciados negativamente pela incorporação de areias recicladas, devido à sua estrutura mais porosa;
- como referido, é necessário determinar para estes agregados a sua capacidade de absorção, assim como a sua evolução no tempo, exigindo-se a publicação de bases normativas para uniformização de procedimentos;
- em suma, os ensaios demonstraram a viabilidade da produção de betão estrutural com areias recicladas de betão, salientando-se que, para pequenas percentagens de substituição (30%), verifica-se uma proximidade entre os valores, tendo no entanto presente que nesta análise eram completamente conhecidas as propriedades do betão de origem das areias.

3.3.1.2. Propriedades dos betões com igual relação A/C [27]

Um outro estudo, realizado no sentido de averiguar as propriedades dos betões com substituição parcial/total da fracção fina, foi elaborado com outras premissas, nomeadamente manteve-se a relação água/cimento livre constante em todas as amassaduras. Talvez este tipo de estudo seja mais orientado para a produção de betão reciclado em central, visto que os seus passos serão mais adequados a um processo produtivo industrial. Neste estudo, estabeleceu-se que a fracção fina seria constituída pelos agregados de dimensões inferiores a 5mm, tendo estes origem em estruturas demolidas, sendo desconhecidas as resistências do betão original. Foi utilizada uma mistura convencional de cimento, agregados finos, agregados grossos e água, sem a adição de quaisquer adjuvantes, na proporção 1:2:4:0,5, em peso. A fracção fina constituída somente por areia natural, no betão de controlo, foi sucessivamente reposta por agregados finos reciclados nas relações 25%, 50%, 75% e 100%, em peso. No quadro 4, apresentam-se algumas características da amassadura e dos respectivos agregados utilizados.

Quadro 4 – Composição das amassaduras e propriedades dos agregados, em kg/m³ [27]

Amassadura / Propriedade	Cimento	Água	Areia natural	Fracção fina reciclada	Agregado grosso
Controlo	325	162	649	0	1298
CC25%	322	161	483	161	1288
CC50%	320	159	320	320	1277
CC75%	317	158	150	475	1267
CC100%	315	157	0	629	1257
Densidade	-	-	2650	2340	2650
Absorção (%)	-	-	0,8	6,25	0,5

Salientam-se de seguida alguns resultados obtidos e principais conclusões observadas. Relativamente às propriedades do betão fresco, estas foram obtidas através do ensaio de abaixamento (slump test)

com cone de Abrams, obtendo-se o intervalo de variação de 170 a 190 mm, aumentando o abaixamento com a percentagem de substituição da fracção fina reciclada. Os valores anteriores permitem concluir que estes betões possuíam uma consistência fluida, pertencendo à classe de abaixamento S₄. A resistência à compressão foi obtida através de cubos de betão de 100 mm de aresta, registando-se os valores obtidos no quadro 5.

Quadro 5 – Resistência à compressão (MPa) dos cubos de betão [27]

Amassadura	1 dia	7 dias	28 dias	90 dias
Controlo	11,7	35,6	46,7	51,1
CC25%	9,2	25,8	35,3	43,6
CC50%	8,9	25,8	35,2	42,1
CC75%	8,6	25,5	35,1	39,9
CC100%	8,4	25,2	30,0	37,8

Sumariamente, transcrevem-se as principais conclusões observadas por análise do quadro anterior:

- a resistência à compressão, como seria expectável, diminui com o aumento da percentagem de substituição;
- para os primeiros 7 dias, as diferenças de resistência entre amassaduras são pouco relevantes; aos 28 dias, a resistência é semelhante para os betões com incorporações compreendidas entre 25% e 75% e diminui para 30 MPa no betão CC100%;
- passados 90 dias de cura, os betões reciclados apresentam maiores ganhos de resistência do que o provete de controlo, apontando para uma remanescente actividade cimentícia de partículas por hidratar oriundas dos agregados finos reciclados; de igual forma, estes valores de resistência diminuem com o aumento da substituição, havendo um decréscimo de cerca de 27% para o betão CC100%, comparativamente com o provete de controlo.

Foram observados maiores valores de retracção e expansão nos betões reciclados. No que concerne à densidade, esta foi também avaliada para todas as amassaduras e para todas as idades, observando-se que, tal como a resistência à compressão, a densidade também diminui com o aumento da substituição da fracção fina e aumenta com o passar do tempo de cura.

3.3.2. UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS GROSSOS RECICLADOS DE BETÃO EM NOVAS AMASSADURAS

São múltiplos os estudos realizados em todo o mundo, no que concerne à incorporação de agregados grossos reciclados em novas amassaduras, com o intuito da produção de betões não-estruturais e estruturais, sendo que, para estes últimos existem até especificações que ditam as regras a cumprir, semelhantes à especificação nacional produzida pelo LNEC [10].

A utilização de agregados reciclados finos, ou grossos para a produção de novos betões, envolve como referido, algumas vicissitudes entre as quais se destacam que, para a produção de dois betões com a mesma resistência, mas com agregados de diferentes origens, natural ou artificial, normalmente é necessário uma maior quantidade de cimento no betão produzido com agregados reciclados para o conseguir, ou seja, quanto maior for a resistência desejada, maior será a quantidade de cimento a incorporar para a obter [24]. De igual forma, na produção do betão novo, deve-se ter presente que a maior absorção de água por parte dos agregados reciclados (5% a 10%) obriga à aplicação de maiores

relações A/C para se obter a consistência desejada [24], no entanto, salienta-se novamente que a utilização de agregados reciclados pré-saturados ou de adjuvantes redutores de água, poderá facilmente contornar esta dificuldade.

3.3.2.1. Propriedades dos betões reciclados [28]

No âmbito do projecto da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), designado por POCTI/ECM/43057/2001, associado a um projecto de investigação conjunto da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e do Instituto Superior Técnico, foram avaliadas as propriedades dos betões reciclados com agregados finos, grossos graníticos e grossos calcários. Neste trabalho apenas se apresentarão as conclusões relativamente à incorporação de agregados grossos graníticos, visto que é o agregado mais utilizado na construção no norte de Portugal. A obtenção dos agregados grossos reciclados foi realizada através da britagem de betão produzido em laboratório, com a designação BNG, a partir do qual foram retiradas conclusões por comparação. Ensaaiaram-se os agregados grossos naturais B1 e B2 e reciclados B1R e B2R, para se aferirem as suas principais propriedades, que são apresentadas no quadro 6.

Quadro 6 – Principais propriedades dos agregados grossos naturais e reciclados, em kg/m³

Propriedade	B1	B2	B1R	B2R
Massa volúmica do material impermeável das partículas	2640		2410	
Massa volúmica das partículas saturadas	2600		2360	
Massa volúmica das partículas secas	2570		2330	
Absorção (%)	0,99		1,41	
Los Angeles (%)	41	39	43	41

Uma vez mais se constata que a massa volúmica e a absorção de água estão relacionadas, variando na razão inversa, com o aumento da percentagem de substituição. Curiosamente, neste ensaio, o coeficiente de absorção de água dos agregados reciclados é bastante próximo do respectivo valor dos agregados naturais e relativamente baixo para agregados reciclados, embora estes agregados tenham sido obtidos em laboratório a partir da trituração de prismas de betão. Seria expectável que este valor fosse bastante superior se os agregados reciclados tivessem proveniência de estruturas demolidas, ou seja, com uma dada percentagem de elementos de alvenaria, que fariam disparar o valor do coeficiente de absorção. O valor da resistência mecânica dos agregados reciclados de betão, obtida através do ensaio de Los Angeles satisfaz a especificação LNEC E373 [29], pois é inferior a 50%.

Após a britagem do BNG, produziram-se os betões BRG50 e BRG100, com 50 % e 100% de substituição, em peso, dos agregados grossos naturais, respectivamente. Os três tipos de betão foram ensaiados em laboratório para avaliar as suas propriedades no estado fresco, no estado endurecido e mediram-se alguns parâmetros para estimar a durabilidade dos betões reciclados. Os parâmetros para avaliar o comportamento do betão fresco seguindo a normalização aplicável foram:

- consistência avaliada em conformidade com a norma NP EN 12350-2 [30];
- massa volúmica, em conformidade com a norma NP EN 12350-6 [31].

As suas características em estado endurecido, que englobam o seu comportamento mecânico, foram as seguintes, de acordo com a normalização aplicável:

- resistência à compressão, em conformidade com a norma NP EN 12390-3 [32]; módulo de elasticidade em compressão, em conformidade com a especificação LNEC E397 [33];
- resistência à tracção por compressão diametral, em conformidade com a norma NP EN 12390-6 [34];
- retracção e expansão, em conformidade com a especificação LNEC E398 [35].

Será de salientar que as propriedades mecânicas do betão produzido com agregados reciclados, são maioritariamente influenciadas pela percentagem de incorporação dos agregados reciclados e de forma menos marcante, pela qualidade dos respectivos agregados e pela resistência do betão que lhes deu origem [24]. A determinação das propriedades relacionadas com a durabilidade, ou seja, a avaliação dos aspectos que possam induzir a degradação do betão e das armaduras, foram as seguintes:

- absorção de água por imersão e por capilaridade em conformidade com as especificações LNEC E394 [36] e LNEC E393 [37], respectivamente;
- resistência à carbonatação, em conformidade com a especificação LNEC E391 [38];
- resistência à penetração por cloretos, em conformidade com a norma ASTM C 1202 97 [39] e com o ensaio CTH Rapid Method [40].

Exibem-se no quadro 7, um resumo dos resultados, apresentados pela ordem anterior, e dos respectivos desvios (Δ), comparativamente ao betão de referência BNG.

Quadro 7 – Principais propriedades dos betões com agregados grossos reciclados

Ensaio	BNG	BRG50%	Δ_{50}	BRG100%	Δ_{100}
Consistência (mm)	80	90	+1 %	90	+1 %
Massa volúmica (kg/m^3)	2380	2270	-5 %	2090	-12 %
Resistência à compressão, 7 dias (MPa)	27,60	25,86	-6 %	23,04	-17 %
Resistência à compressão, 28 dias (MPa)	32,00	28,53	-11 %	27,82	-13 %
Módulo de elasticidade (GPa)	32,1	27,3	-15 %	22,1	-31 %
Resistência à tracção por compressão diametral (MPa)	2,3	2,1	-9 %	1,9	-17 %
Expansão	+0,00008	+0,00011	+38 %	+0,00015	+88 %
Retracção	-0,00070	-0,00059	-16 %	-0,00054	-23 %
Absorção de água por imersão (%)	3,28	3,78	+15 %	4,45	+37 %
Absorção de água por capilaridade às 72 horas (g/mm^2)	0,0204	0,0243	+19 %	0,0297	+46 %
Profundidade de carbonatação (mm)	11,3 mm	17,8	+58 %	18,6	+65 %
Resistência à penetração de cloretos (C)	7293	7869	+8 %	7857,6	+8 %
Resistência à penetração de cloretos (m^2/s)	$6,8 \times 10^{-12}$	$6,8 \times 10^{-12}$	+0,3 %	$7,0 \times 10^{-12}$	+3 %

Tendo em consideração que os agregados reciclados foram obtidos de forma controlada em laboratório, a análise dos resultados permite constatar alguns aspectos, entre os quais se destacam:

- relativamente à trabalhabilidade dos betões, para garantir abaixamentos na ordem de 80mm a 100mm é necessário aumentar a quantidade de água proporcionalmente ao aumento da percentagem de incorporação dos agregados reciclados, devido à maior absorção dos agregados;
- a massa volúmica dos betões decresce com a substituição, devido à argamassa aderente mais porosa na superfície dos agregados reciclados, induzindo a que a sua própria massa volúmica seja também menor;
- a resistência à compressão diminui cerca de 15% nos betões com total incorporação de agregados reciclados, não havendo, no entanto, grande diferença de resultados entre os betões BRG50 e BRG100;
- o módulo de elasticidade diminui acentuadamente com a incorporação de agregados reciclados atingindo perdas de 30% no betão BRG100;
- a resistência à tracção diminui com a incorporação de agregados reciclados;
- a expansão aumenta com o aumento de incorporação de agregados reciclados, devido à maior absorção de água causada pelos vazios oriundos da argamassa aderente à superfície dos agregados; contrariamente à expansão, nestes resultados a retracção parece diminuir com o aumento da incorporação dos agregados reciclados, podendo este facto estar relacionado com a diminuição da quantidade de pasta de cimento presente na composição do betão provocada pelo maior volume de agregados;
- tanto a absorção de água por imersão, como a absorção de água por capilaridade, aumentam com a incorporação de agregados reciclados, sendo este aumento ligeiramente superior na absorção por capilaridade;
- a profundidade de carbonatação aumenta com a incorporação de agregados reciclados, diminuindo a resistência à carbonatação do betão; os valores são bastante próximos nos dois betões reciclados, permitindo prever que a maior variação desta grandeza possa ocorrer no intervalo de substituição de agregados de 0% a 50%;
- os dois ensaios de resistência à penetração de cloretos, permitiram concluir que os betões reciclados são altamente permeáveis à penetração por cloretos, aumentando com a incorporação de agregados reciclados e diminuindo ao longo do tempo;

Entre as principais conclusões, enumeram-se seguidamente algumas dignas de destaque, relacionadas com a viabilidade dos betões com agregados grossos reciclados. Existe verdadeiramente uma redução das propriedades mecânicas dos betões produzidos com agregados reciclados grossos de cerca de 10% para as resistências à compressão e à tracção para os betões com 50% de substituição, o que permite concluir, que para percentagens de incorporação menores, esta influência será muito inferior. No entanto, o módulo de elasticidade é o parâmetro mais afectado, sendo que, para obter betões de igual classe de resistência que os betões normais (com agregados naturais), será necessário introduzir maior quantidade de cimento nas novas amassaduras. Estas constatações obrigam a que sejam efectuados estudos específicos de composição dos betões, designadamente na quantidade de cimento e de água de amassadura, para se garantirem as resistências e consistências pretendidas, no entanto, a utilização de agregados pré-saturados evitará aumentar a quantidade de água.

O emprego destes agregados induz menores resistências mecânicas, deformabilidades e absorções superiores, podendo condicionar aspectos de desempenho, com reflexos ao nível da durabilidade. No entanto, a sua aplicação em betões estruturais permite a utilização das regras habituais de

dimensionamento. Uma vez mais se infere, que a utilização de agregados reciclados com fins estruturais deve ser confinada à produção controlada em central de betão pronto, devido a todas as preocupações já expressas e que podem afectar de forma significativa a qualidade do produto.

3.3.2.2. Trabalhabilidade dos betões reciclados garantida com adição de adjuvantes [41]

A utilização de agregados pré-saturados evita, como referido, o aumento da relação água/cimento. No entanto, há um maior consumo de água, ainda que pouco significativo, para se atingir a saturação. A utilização de superplastificantes tem como objectivo a redução da água de amassadura, mantendo-se a mesma trabalhabilidade, o que para a mesma dosagem de cimento, reduz a relação água/cimento e eleva a as resistências mecânicas dos betões. Esta utilização pretende contrariar a perda de água efectiva, ou seja, aquela que realmente está disponível como água de amassadura, devido à maior absorção por parte dos agregados reciclados, mantendo-se constante a água de amassadura total. Espera-se que a utilização dos superplastificantes seja eficaz, visto que, estes podem permitir uma redução do teor em água de pelo menos 12%, para igual trabalhabilidade. Neste sentido, foi realizado um estudo no Instituto Superior Técnico de Lisboa, sobre o efeito dos adjuvantes em betões com agregados grossos reciclados. Os agregados utilizados na produção dos betões reciclados foram agregados finos e grossos calcários naturais com substituição parcial/total da fracção grossa por agregados reciclados de betão, com origem em elementos de betão à vista retirados do estádio José de Alvalade. O ligante hidráulico utilizado foi cimento Portland tipo I da classe 42,5. A composição base de todas as amassaduras seguiu o traço aproximado de 1:1,5:2,5:0,5, em peso, relativamente ao cimento, areia, brita e água. A fracção grossa natural ou reciclada sofreu o mesmo processo de fragmentação mecânica e separação por peneiração. Os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados apresentam-se sucintamente no quadro 8.

Quadro 8 – Principais propriedades dos agregados finos e grossos [41]

Propriedade	Fracção fina	Agregado grosso	Fracção reciclada
Massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/m ³)	2597	2687	2608
Massa volúmica do material saturado com superfície seca (kg/m ³)	2564	2652	2452
Massa volúmica das partículas secas (kg/m ³)	2544	2632	2355
Absorção (%)	0,81	0,79	4,12

Uma vez mais se conclui, que a massa volúmica dos agregados reciclados é menor e a absorção de água é maior comparativamente aos agregados naturais, devido à argamassa mais porosa, aderente à superfície dos agregados.

O objectivo deste estudo era estimar qual a dosagem de superplastificante (por cada 100 kg de cimento) a adicionar aos betões reciclados com diferentes taxas de substituição da fracção grossa (25%, 50%, 75% e 100%) em volume, de forma a obter a trabalhabilidade de 80 ± 10 mm, medida com cone de Abrams. Para este efeito, estudou-se para todas as composições recicladas, qual o resultado da

adição de dois tipos de adjuvantes diferentes, designados por 1 e 2, comparativamente com a situação de não adicionar qualquer adjuvante. Apresenta-se, no quadro 9, um resumo dos valores obtidos.

Quadro 9 – Efeito da adição de adjuvantes em betões reciclados [41]

Amassadura	Trabalhabilidade (mm)	Dosagem de plastificante (kg/100kgCimento)	Massa volúmica do betão fresco (kg/m ³)
BReferência	85	0	2447
B25%.Sem Adjuvantes	57	0	2332
B50%.Sem Adjuvantes	44	0	2300
B100%.Sem Adjuvantes	35	0	2260
B25%.Adj. tipo 1	88	0,42	2308
B50%.Adj. tipo 1	77	0,45	2296
B100%.Adj. tipo 1	78	0,48	2248
B25%.Adj tipo 2	90	0,50	2340
B50%.Adj tipo 2	78	0,50	2284
B100%.Adj tipo 2	75	0,50	2234

Destacam-se seguidamente, as principais conclusões retiradas por observação do quadro anterior, tendo presente que os agregados reciclados foram produzidos em laboratório:

- nos betões com substituição da fracção grossa por agregados reciclados, mas sem adição de adjuvantes, observa-se que ocorrem maiores perdas de trabalhabilidade com o aumento da substituição, devidas à maior absorção dos agregados reciclados, em que o betão de referência e o betão 100% reciclado apresentam os valores de 85mm e 35mm, respectivamente;
- de igual forma, decaem os valores da massa volúmica, com o aumento da substituição, devido à presença da argamassa aderente mais porosa;
- para manter a trabalhabilidade no intervalo definido, com o superplastificante tipo I, verificou-se que foi necessário aumentar a dosagem de superplastificante de acordo com o aumento da percentagem de substituição de agregados reciclados;
- para manter a trabalhabilidade no intervalo definido, com o superplastificante tipo II, verificou-se que não foi necessário aumentar a dosagem de superplastificante de 0,5 kg/100kg de cimento, para se obter o pretendido, independentemente da taxa de substituição de agregados reciclados;
- com a utilização dos superplastificantes não se verificaram diferenças nos valores obtidos das massas volúmicas dos betões frescos, concluindo-se que estes não têm influência neste parâmetro.

Em suma, pode concluir-se que com a adição de 0,5 kg/100kg de cimento de qualquer tipo de superplastificante, tipos 1 ou 2, são garantidas as trabalhabilidades desejadas (80 ± 10 mm) para todas

as combinações de incorporação de agregados reciclados, evitando desta forma, o aumento da quantidade de água de amassadura.

3.4. DIRECTRIZES DE CARÁCTER NORMATIVO RELATIVAS AO EMPREGO DE AGREGADOS GROSSOS RECICLADOS

3.4.1. ESPANHA [24]

Destacam-se neste trabalho, alguns requisitos impostos em Espanha na utilização de agregados **reciclados grossos de betão** na produção de novas amassaduras de betão estrutural, para estabelecer um termo comparativo, visto ser um país com proximidade geográfica que, tal como Portugal, apenas recentemente começou a indagar sobre os resíduos de construção e demolição. As indicações que se seguem, ainda não possuem carácter de obrigatoriedade, no entanto, acredita-se que serão poucas as alterações aquando do processo de aprovação. Em Espanha, tal como em outros países do mundo, incluindo Portugal, são colocadas algumas barreiras ao uso de agregados reciclados, nomeadamente nas aplicações em betão pré-esforçado, sendo neste caso, expressamente proibido, assim como nas aplicações em betão simples ou armado cuja resistência à compressão ultrapasse os 40 MPa. Os agregados, como referido, poderão apenas ser utilizados em betão simples e/ou armado, mas a sua proveniência não pode ter origem em betão leve, em betões com cimento aluminoso ou em betões reforçados com fibras. De igual forma, os betões que possam originar agregados reciclados, após demolição, devem possuir uma resistência mecânica mínima para garantir propriedades adequadas e uniformidade aceitável. Os agregados reciclados devem ser acompanhados por um documento de identificação dos escombros de origem, que indique:

- natureza dos agregados (betão simples, armado, etc...);
- empresa transportadora e máquina que deu origem aos agregados;
- presença de impurezas (cerâmicos, madeira, asfalto, etc...)
- detalhes sobre a sua origem (tipo de estrutura e localização);
- qualquer outra informação relevante (causa da demolição, contaminação por cloretos, betão afectado por reacções alcali-agregado, etc...).

A utilização de betões reciclados será limitada a ambientes não-agressivos ou, quando aplicados em ambientes agressivos, devem ser tomadas precauções especiais.

Para a aplicação comum em betão estrutural, estabeleceu-se que a restrição da percentagem de 20% em peso de incorporação de agregados reciclados, não introduz diferenças relativas no que concerne à qualidade e uniformidade, comparativamente com o betão convencional, no entanto, a granulometria da fracção reciclada deve ter dimensões superiores a **4 mm**, ou seja, só se podem substituir os agregados grossos. A opção pela substituição em peso de 20%, acarreta uma perda de resistência à compressão inferior a 5 %. Quando o betão novo é produzido com agregados reciclados de alguma qualidade e a resistência a obter não é muito elevada, a incorporação de 20% de agregados reciclados origina diferenças pouco relevantes comparativamente com um betão de referência. De qualquer forma, geralmente é recomendada a incorporação na mistura de aditivos ou adjuvantes superplastificantes, para garantir a trabalhabilidade dos betões, particularmente quando os agregados reciclados utilizados não forem pré-saturados. É permitido o uso de adições, de forma semelhante ao utilizado nos betões convencionais.

No entanto, visto que os agregados reciclados possuem características heterogéneas e menor qualidade, são impostos alguns limites nas suas propriedades mais relevantes, para que estas não diminuam a qualidade do novo betão. Algumas destas propriedades são: a absorção de água, o teor de

finos, o coeficiente de forma, a perda por fragmentação de Los Angeles, os teores de cloretos e sulfatos e o teor de partículas com baixa massa volúmica (partículas leves). Estes agregados, devido à sua origem contêm impurezas como partículas cerâmicas, asfalto, vidro, plásticos e metal, entre outros, que devem, de igual forma, ser limitadas para não influenciar muito negativamente a resistência do betão a produzir. No quadro 10, apresentam-se algumas das propriedades que devem possuir, tanto os agregados reciclados, como os agregados naturais, para que a mistura possua determinadas características desejáveis aquando da substituição de 20%. Porém, existem certos requisitos mais exigentes, que os agregados reciclados devem cumprir, quando se opta pela substituição total da fracção grossa.

Quadro 10 – Propriedades exigidas aos agregados e à mistura, em Espanha [25]

Propriedade	Agregados Reciclados ($\leq 20\%$)	Agregados Naturais ($\geq 80\%$)	Agregados Reciclados (100%)
Absorção de água	$\leq 7\%$	$\leq 4,5\%$	$\leq 5\%$
Densidade	$\geq 2 \text{ kg/m}^3$	-	-
Teor de finos	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$
Teor de argila	$\leq 0,6\%$	$\leq 0,16\%$	$\leq 0,25\%$
Teor de partículas leves	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$
Perda por desgaste de Los Angeles	$\leq 40\%$	$\leq 40\%$	-
Material cerâmico	$\leq 5\%$	-	-
Asfalto	$\leq 1\%$	-	-
Outros materiais (madeira, plástico, metais, etc...)	$\leq 1\%$	-	-

Algumas especificações existentes e estudos experimentais realizados aconselham a que se limitem as máximas resistências à compressão dos betões reciclados, para diferentes percentagens de incorporação, como pode ser visualizado no quadro 11.

Quadro 11 – Limites máximos de resistência à compressão, em alguns países/organizações [24]

País / Organização	Resistência à compressão (MPa) para 100% de substituição	Resistência à compressão (MPa) para 20% de substituição
RILEM	50	Sem limite
Hong-Kong	20	25-30
Bélgica	30	-
Reino Unido	40	Sem limite
Espanha	40	40

Em suma, em Espanha propôs-se o limite de 20% em peso da taxa de substituição dos agregados reciclados, porque se concluiu que esta percentagem pouco influenciava as propriedades mecânicas, nomeadamente a resistência à compressão, a resistência à tracção e o módulo de elasticidade. Relativamente ao fenómeno da retracção, verificam-se para a taxa de 20%, valores ligeiramente superiores de retracção comparativamente com betões normais, devido às características dos agregados reciclados e ao uso de maior quantidade de cimento para se obter uma dada resistência. Tal como na retracção, o fenómeno de fluência do betão aumenta com a taxa de incorporação crescente dos agregados reciclados, no entanto, a incorporação de taxas inferiores a 20%, praticamente não provoca alterações. Relativamente à durabilidade dos betões reciclados, como referido anteriormente, os agregados reciclados são mais porosos devido à presença da argamassa aderente, logo tornam-se mais vulneráveis às condições atmosféricas, sendo necessário acautelar as aplicações deste tipo de betão em ambientes agressivos. Algumas formas aconselhadas para colmatar esta vulnerabilidade, poderão passar por aumentar a quantidade de cimento ou reduzir a relação A/C, tornando a matriz cimentícia mais fechada e consequentemente menos porosa, ou ainda aumentar o recobrimento das armaduras.

3.4.2. PORTUGAL

Muita atenção tem sido prestada nos últimos anos, na necessidade da criação de normas técnicas aplicáveis aos agregados derivados de RCD's, sendo universalmente aceite na indústria da construção que especificações devidamente formuladas com base nas suas propriedades, podem permitir a utilização segura destes produtos [4].

Um dos grandes impulsos à generalização da utilização dos processos de reciclagem e que ajudam a desmistificar o “receio” da incorporação de agregados reciclados de RCD's em novos betões, é o processo de validação do emprego destes produtos por entidades reconhecidas e acreditadas nacionalmente. Este processo de “validação” e “aceitação” por parte de todos os intervenientes na indústria da construção, é peça fundamental. Existem duas importantes características destes agregados que devem ser tidas em consideração no processo de validação, de forma a permitir a sua utilização controlada em betão armado. A primeira prende-se naturalmente com o controle das suas “novas” propriedades, que obriga ao surgimento de novos parâmetros de verificação de qualidade tais como o teor de argamassa aderente, ou o teor de impurezas e o ajuste dos procedimentos de ensaio existentes, no sentido de viabilizar o seu emprego neste tipo de agregados. A segunda característica relacionada com a sua origem, impele a que surjam novos métodos de demolição selectiva, de forma a reduzir ao mínimo a heterogeneidade da sua constituição [21].

No nosso país, esta incumbência coube ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em resultado de solicitação por parte do Instituto Nacional dos Resíduos (INR), actualmente conhecido como Agência Portuguesa do Ambiente (APA). O LNEC foi assim solicitado para a elaboração de especificações técnicas para a utilização desta fileira de resíduos em diversas aplicações, tais como material para betão, material para misturas betuminosas, material para sub-base e base de pavimentos e ainda, como material para aterros. Desta forma, surgem as seguintes especificações [11]:

- **LNEC E471** – guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos;
- **LNEC E472** – guia para a reciclagem de misturas betuminosas a quente, em central;
- **LNEC E473** – guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos;

- **LNEC E474** – guia para a utilização de resíduos de construção e demolição em aterro e camada de leito de infra-estruturas de transporte.

No âmbito deste trabalho apenas será abordada detalhadamente a especificação LNEC E 471, que tem como objectivo classificar os agregados grossos reciclados abrangidos pela norma NP EN 12620, “Agregados para betão”, estabelecendo os requisitos mínimos que estes deverão satisfazer para poderem ser utilizados no nosso país, no fabrico de betões de ligantes hidráulicos. Caso contrário, a variação das propriedades poderia tornar impraticável a utilização destes resíduos como agregados. Será de salutar que esta especificação não inclui a incorporação dos finos devido às suas características terem uma influência marcadamente mais negativa, nomeadamente possuírem elevada percentagem de elementos com dimensão inferior a 0,063 mm, maior absorção de água e dificultarem o controlo da trabalhabilidade comprometendo a resistência mecânica dos betões [11].

Relativamente à classificação dos agregados reciclados, esta especificação introduz três grupos de agregados consoante a sua composição, ARB1, ARB2 e ARC, estabelecendo determinados níveis de “pureza”. As classes ARB1 e ARB2 são as que possuem menor quantidade de partículas indesejáveis, sendo a sua constituição maioritariamente betão, misturado ou não, com agregados não ligados. Os agregados do tipo ARC, são agregados em que da sua constituição fazem parte o betão, agregados não ligados e elementos de alvenaria, sendo possível qualquer combinação de percentagens destes elementos. Esta identificação e respectiva classificação **são da responsabilidade do produtor** (operador de gestão). De salientar, que estas especificações, são omissas relativamente à qualidade do betão que deu origem aos agregados, nomeadamente, a sua resistência à compressão, impondo apenas restrições às propriedades dos agregados sendo, no entanto, recomendado que os resíduos com diferentes origens e constituintes, sejam armazenados em separado, evitando misturas de materiais com diferentes características.

Como referido anteriormente, conforme o fim a que se destinam os agregados reciclados, existem requisitos mínimos que estes devem satisfazer, para que as suas propriedades não deteriore o produto final. Assim, nos quadros 2 e 3 desta especificação, são apresentadas as propriedades e requisitos mínimos de conformidade dos agregados reciclados grossos para todas as aplicações e para certas aplicações, respectivamente.

3.4.2.1. Percentagens de substituição permitidas

Os agregados classificados como ARB1 e ARB2, segundo a especificação LNEC E471, podem ser usados no fabrico de betão para aplicar em elementos de **betão simples** ou **armado**, ou seja, em betões com função estrutural. No entanto, esta incorporação em betão armado será limitada pela percentagem de substituição **em peso**, pela resistência máxima dos novos betões e pela classe de exposição ambiental a que se destinam os elementos, como se pode visualizar no quadro 12.

Quadro 12 – Classes de resistência e classes de exposição ambiental permitidas [10]

Classe de agregado reciclado	Classe de resistência máxima	Percentagem de incorporação máxima	Classe de exposição ambiental
ARB 1	C40/50	25%	X0,XC1,XC2,XC3,
ARB 2	C35/45	20%	XC4,XS1,XA1

Para betões simples, de enchimento, ou de regularização, não sujeitos a ambientes agressivos não existe qualquer restrição relativamente à percentagem de incorporação destes agregados. No entanto, a utilização dos agregados ARC fica limitada a betões de enchimento, ou de regularização, sem qualquer função estrutural e em ambientes não agressivos.

Actualmente, são estas as especificações técnicas que regem a aplicação de agregados reciclados no nosso país, sendo inclusivamente referido na nova legislação para resíduos de construção e demolição (DL 46/08), que a utilização de RCD's em obra deve ser em conformidade com estas. Em suma, comparativamente com as futuras disposições espanholas, as especificações nacionais não incluem informação ou indicações relativas ao local de produção do betão estrutural (que deve ser em central de betão pronto), nem aos cuidados a atender no seu fabrico, nomeadamente, o aumento da dosagem de cimento para adquirir uma dada resistência. Esta especificação é de igual forma omissa relativamente aos cuidados a atender para se atingirem condições de trabalhabilidade desejáveis, como o aumento das relações água/cimento, a utilização de adjuvantes redutores de água de amassadura ou a pré-molhagem dos agregados.

4

VIABILIDADE DO EMPREGO DE AGREGADOS RECICLADOS

4.1. VIABILIDADE DA PRODUÇÃO EFECTIVA DE RCD'S DE QUALIDADE

4.1.1. VIABILIDADE DO APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO

Por este objectivo, assim como noutros na construção, a atitude da “procura”, ou seja, do Dono-de-obra é decisiva. Se o Dono-de-obra valorizar abordagens sustentáveis e preocupações com os resíduos, os outros agentes, ou seja, a “oferta” vai sentir necessidade de responder a essas solicitações. Neste ponto, salienta-se a importância da postura dos Donos-de-obra públicos, na medida em que as preocupações ambientais tidas em consideração nas obras públicas, servirão como ponto de partida para os seus colaboradores as praticarem e incentivarem nas obras particulares. Uma outra forma de valorizar o emprego de agregados derivados de RCD's é através da prescrição dos conteúdos dos cadernos de encargos. Esta ferramenta, que assume uma vez mais um papel extremamente importante na construção, neste caso na viabilização do emprego de agregados reciclados e na eventual possibilidade de se valorizarem as propostas que manifestem estas preocupações, ainda na fase de concurso.

Outra vertente associada à viabilidade da separação dos resíduos da construção, está dependente da vontade da própria empresa de construção para assumir uma atitude ambientalmente mais responsável. Por uma questão de meios e de oportunidade, talvez apenas as empresas de maior dimensão tenham actualmente condições para o fazer. Nesse sentido, não basta somente o despoletar de uma consciencialização para práticas ambientalmente mais correctas, mas sim um verdadeiro investimento na criação de condições, na formação dos agentes envolvidos e na negociação com operadores de resíduos que efectuem a recolha e o transporte. O processo de negociação com os gestores de resíduos torna-se uma peça económica útil, salientando-se como exemplo, a utilização das sobras de armaduras e das madeiras como crédito a descontar face à recolha dos restantes resíduos. A criação de condições passará por ter em obra verdadeiros “ecopontos” de resíduos e reservar espaço de estaleiro para a sua localização. A formação dos agentes envolvidos, nomeadamente, directores de obra, técnicos e operários de construção, é essencial pois será através destes que será garantido o sucesso dos objectivos a atingir. O conjunto das medidas anteriores implicará um investimento irrisório, face aos montantes em questão em obras grandes, que será tanto menor consoante o grau de diferenciação dos resíduos. Será mais fácil investir em obras de alguma envergadura, em que a produção de resíduos tenha dimensão suficiente para compensar a instalação dos “ecopontos” e respectivas vicissitudes inerentes.

Tendo presente que nas obras de construção, se geram em média cerca de 10% de resíduos face ao volume total de materiais a incorporar na obra, correspondentes às sobras e desperdícios desses materiais, constata-se que em grandes obras, esta percentagem equivale a uma grande quantidade de RCD's, que importa certamente recuperar/reaproveitar.

O volume e constituição dos resíduos dependem do tipo de obra e das suas especificidades. Seguidamente, focar-se-á a situação mais comum que ocorre actualmente em Portugal. Em obras de construção de edifícios, a maior quantidade de “resíduos” está associada à fase de movimentação de terras, nomeadamente, aos volumes escavados que são recolhidos e imediatamente transportados em camiões. Para este “resíduo”, não é necessária qualquer intervenção dos agentes em obra e fica à responsabilidade do empreiteiro/construtor, o destino final a dar às terras. Na fase de estruturas, em obras com “esqueleto” em betão armado, os materiais predominantes são os inertes e as armaduras, resultando resíduos maioritariamente constituídos por embalagens de cimento (e eventualmente, de adjuvantes), desperdícios ou sobras de madeiras de cofragem e aço sendo este último, 100% reciclável. Nesta fase, quando se opta por utilizar betão pronto, principalmente em obras grandes, é necessário despende de grande quantidade de água para a lavagem dos camiões betoneira. A água potável, torna-se cada vez mais um recurso escasso que interessa preservar e poupar para garantir a prossecução da vida no nosso planeta. Neste sentido, algumas empresas realizam já nas suas obras a reciclagem da água sobranse da lavagem dos camiões betoneira através de simples decantação em recipientes distintos, ficando a água com qualidade suficiente para ser devolvida à rede pública de drenagem de águas pluviais, ou até para ser reutilizada na própria obra. Resultante da visita a duas grandes obras em betão armado, na zona do grande Porto que se encontravam na fase de estruturas em Maio de 2008, nomeadamente, a construção adjacente ao Estádio do Dragão e o novo shopping Vivaci da Maia, concluiu-se que as duas empresas de construção distintas, possuem condições e realizam efectivamente a separação dos resíduos correspondentes a esta fase.

Na obra adjacente ao Estádio do Dragão, aquando da recolha das imagens seguintes, verificou-se que existiam “ecopontos” nas imediações da construção em betão armado, nomeadamente o “madeirão” e o “armadurão” (figuras 25 e 26), para armazenamento dos devidos materiais sobranse, madeira e aço.

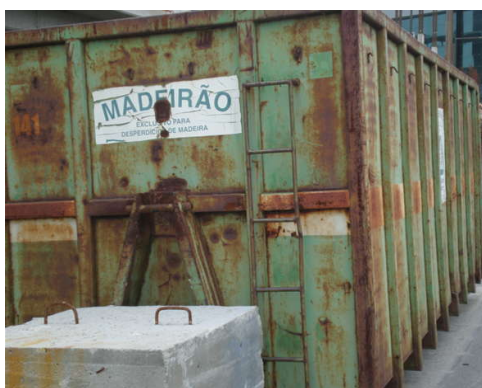


Fig.25 e 26 – Exemplos de “ecopontos” da fase de estruturas da obra adjacente ao Estádio do Dragão

Na obra do shopping da Maia, verificou-se a existência de contentores para recolha de madeiras e de metais (figuras 27 e 28), assim como, big-bags para recolha de plásticos e cartão e ainda três “tinhas” de decantação para aproveitamento das águas sujas de lavagem dos camiões betoneira (figuras 29 e 30).



Fig.27 e 28 – Exemplos de “ecopontos” da fase de estruturas da obra do shopping da Maia



Fig.29 e 30 – Exemplos de “ecopontos” big-bags da obra do shopping da Maia

Na fase seguinte, de acabamentos e arranjos exteriores, torna a existir um grande volume de resíduos correspondentes às embalagens de todos os materiais a incorporar na obra e respectivas sobras, desperdícios, alguns elementos danificados em obra sem qualidade para aplicação e ainda resíduos referentes aos “roços” necessários para inserção das tubagens eléctricas nas paredes.

Como observado anteriormente, diferentes fases implicam diferentes resíduos e necessariamente, diferentes formas de abordar o processo da recuperação. Neste sentido, devem ser colocados diferentes contentores em obra para recolherem a maior quantidade de resíduos com potencial de reaproveitamento correspondentes a cada fase, adoptando, desta forma, práticas de construção com separação selectiva de resíduos, por fases. Uma outra abordagem, com mais valia e menos incómodo para o decorrer da obra, mas com diferentes custos de operação dos resíduos, é a adopção de um contentor único de recolha de todos os resíduos gerados em todas as fases. Como é evidente, as empresas de recolha, transporte e operação de resíduos, tendem a valorizar os resíduos separados, os quais designam por RCD's limpos, estabelecendo para estes um custo de recolha por tonelada muito inferior ao dos RCD's indiferenciados. A empresa Trianovo que oferece serviços de gestão de resíduos de construção e demolição em Portugal, actualmente já possui a marcação CE relativa à qualidade dos produtos que vende, nomeadamente, os agregados reciclados. Esta empresa presta serviços de recolha, transporte, recepção e tratamento de RCD's, como se pode visualizar nas figuras 31 e 32.



Fig.31 e 32 – Tratamento de RCD's na empresa Trianovo [42]

Esta empresa, coloca à disposição dos clientes várias formas de recolha dos resíduos como camiões para o transporte de terras, big-bags e contentores de vários tamanhos para os restantes resíduos, como se pode visualizar nas figuras 33, 34 e 35.



Fig.33, 34 e 35 – Formas de recolha de RCD's efectuada pela empresa Trianovo [42]

Em Portugal esta realidade não está ainda verdadeiramente enraizada. Existem várias empresas de construção, que publicitam a prática de atitudes ambientalmente correctas, no entanto, como em várias outras áreas, por vezes, não passa de uma falsa publicidade. Outras, porém, têm os meios de separação colocados à disposição dos operários, mas não possuem interesse e vigilância suficientes. Na maioria das vezes, estas práticas não são mais do que possuir em obra um contentor de resíduos indiferenciados, originando a sua mistura e posterior recolha por operadores de resíduos. A realidade associada à correcta separação e devida importância dada a estes resíduos, poderá no futuro vir a concretizar-se convenientemente, tendo recentemente como “incentivo” a nova lei específica para a gestão dos RCD's. No entanto, actualmente em Portugal poucas são as empresas de construção verdadeiramente empenhadas nesta problemática.

4.1.2. VIABILIDADE DO APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DE DEMOLIÇÃO

A possibilidade do aproveitamento dos resíduos de demolição tem como ponto de partida a adopção de práticas de demolição com vista à reciclagem, ou seja, processos de demolição do tipo selectivo. Só desta forma se poderá garantir uma qualidade mínima para os resíduos poderem ser reaproveitados, pois a adopção das técnicas do tipo tradicional, tornam o produto final numa mistura indiferenciada, praticamente impossível de separar e reaproveitar de forma valorizada. O produto resultante das demolições de estruturas de betão é maioritariamente constituído por fracção inerte, que deve sofrer processos de tratamento e redução de tamanho para poder ser novamente empregue na construção. Estes processos podem ocorrer directamente em obra, em centrais móveis, ou em centrais fixas de reciclagem (figuras 36 e 37) após o transporte dos resíduos, envolvendo estas duas opções, diferentes custos de processo.

A opção por centrais móveis pode ter dois objectivos distintos. O primeiro prende-se com o aproveitamento do material da demolição e posterior utilização na futura obra a construir, enquanto que o segundo poderá passar somente por uma redução do tamanho para maximizar as quantidades a transportar, reduzindo os custos de transporte até às centrais fixas. Mesmo que o objectivo passe por aproveitar o material resultante das demolições, este reaproveitamento nunca utilizará toda a

quantidade de resíduos inertes gerada, tendo necessariamente, uma parte que ser transportada para a central de reciclagem. Neste caso, será necessário dispor, no estaleiro de obra, de um local para armazenar a fracção inerte reciclada, até à fase em que será utilizada.



Fig.36 e 37 – Exemplos de centrais móveis (à esquerda) e fixas (à direita) [11]

A opção por tratar os resíduos de demolição em central fixa acarreta custos de processo e de transporte mais elevados, mas a qualidade do produto final é superior, permitindo a sua aplicação em diversos fins e de maior nobreza. A localização destas centrais deve ser na periferia das cidades, pois são estas que possuem a matéria-prima (resíduos de estruturas em betão armado) para o seu funcionamento, assim como, para reduzir os custos de transporte que neste processo poderão ser condicionantes. A viabilidade da existência destas centrais fixas, que envolvem um grande investimento quer no espaço e no apetrechamento da solução na redução dos impactes ambientais gerados, quer nos equipamentos necessários, passa por existir matéria-prima que alimente o seu processo produtivo a baixos custos, assim como, posteriormente, deve existir mercado para a comercialização do produto final agregado reciclado, entre outros aspectos.

4.2. VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DOS AGREGADOS DERIVADOS DE RCD'S

4.2.1. APLICAÇÕES EM AGREGADOS INDIFERENCIADOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL

São inúmeras as aplicações que se podem dar aos agregados reciclados de RCD's, podendo estes substituir os agregados naturais na grande maioria das situações de utilização corrente. Exceptuam-se as aplicações em betão armado em zonas de ambientes agressivos e em betão pré-esforçado, entre outras, de carácter mais específico e exigente. A abrangência da aplicação destes agregados ficará ao critério e imaginação de cada um, mas principalmente prende-se com a confiança na qualidade destes sub-produtos. Enquanto não se ultrapassarem as barreiras psicológicas associadas à utilização destes agregados, juntamente com o preço actualmente não competitivo face à compra de inertes naturais, estes não terão condições de serem verdadeiramente viáveis. Tentou-se neste trabalho, incluir alguns dados sobre a viabilidade da aplicação de agregados indiferenciados que envolvesse um volume considerável para o seu escoamento, associada a imagens das várias oportunidades que estes agregados terão para se implantarem. Salientam-se de seguida, algumas das sugestões de aplicação, fundamentadas em critérios exigidos em função do uso do material.

4.2.1.1. Aplicações em estradas

A forma mais simplista que tem sido utilizada para escoar um grande volume de agregados grossos reciclados, com grau de heterogeneidade elevado, tem sido em algumas estradas portuguesas. Sobre a forma de agregados para pavimentação em bases e sub-bases de estradas, existindo como elemento

regulador a especificação LNEC E473. Normalmente, os solos com qualidade suficiente resultantes das operações de escavação, são utilizados na construção dos aterros. No entanto, poderão surgir situações em que o volume de terras escavado seja insuficiente. Sempre que exista material rochoso abundante resultante das operações de escavação, ou quando se preferir, o aterro pode ser executado com material rochoso (pedrapleno), nomeadamente, na parte inferior do aterro e no corpo do aterro (figuras 38 e 39), devendo apenas atender-se a que a granulometria do material (máxima dimensão dos agregados granulares) não pode exceder 2/3 da espessura da camada a compactar. Esta última aplicação, que consumirá certamente grande quantidade de material granular, é regulada pela especificação LNEC E474.



Fig.38 e 39 – Exemplos de aplicação de agregados reciclados em estradas [11]

Também na construção de estradas principais, é necessário um grande consumo de material inerte de elevada granulometria, com simples funções de drenagem e sem qualquer requisito estrutural. Salienta-se uma situação comum em taludes de escavação, na realização de valetas revestidas em que, com o envelhecimento do pavimento, se torna necessário drenar a sua fundação, o próprio pavimento ou a berma, evitando a degradação da plataforma de rodagem, orientando as águas pluviais para “ecrans” drenantes que são constituídos por drenos longitudinais à estrada (figura 40), materializados por colectores de plástico perfurado, envoltos em material britado. Neste caso, a utilização de material inerte reciclado ao longo da extensão dos taludes de escavação com valetas revestidas, permite o escoamento deste produto e não se colocam problemas de poluição das águas pluviais, visto que este facto já ocorreu forçosamente dado estas atravessarem a plataforma e se prever o seu tratamento a jusante.

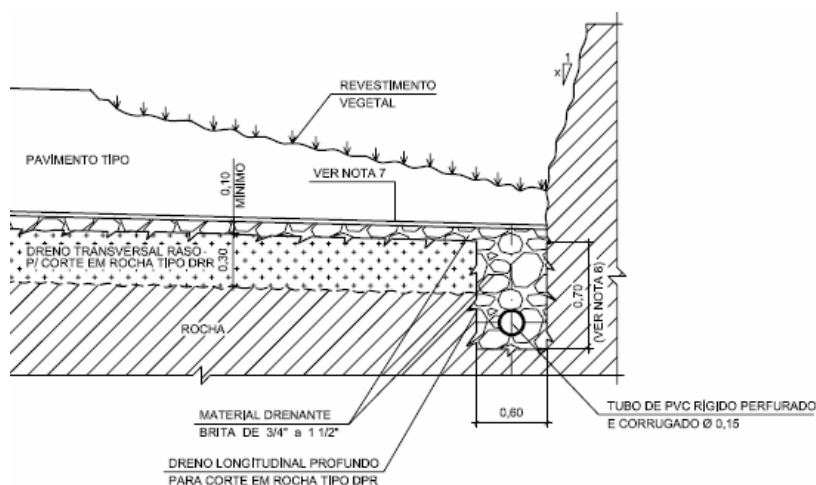


Fig.40 – Esquema de dreno longitudinal [43]

No interior de Portugal, muitas das estradas são ainda caminhos rurais em terra (figuras 41 e 42) e carecem de manutenção anual para garantir as condições mínimas de circulação. Nesse sentido, podem empregar-se agregados reciclados, como utilizou a Câmara Municipal de Montemor-o-Novo, no âmbito do projecto REAGIR (referido no capítulo 2).



Fig.41 e 42 – Exemplo de aplicação de agregados reciclados na recuperação de caminhos rurais [44]

Alguns taludes de escavação e de aterro necessitam de contenção, materializada muitas vezes à custa de muros de cestos de gabiões (figuras 43 e 44). Existem algumas exigências que constam no caderno de encargos do Instituto de Estradas de Portugal, para as características do material granular que vai preencher os cestos. Os requisitos gerais exigem ao material que seja são, duro, compacto, inatacável pela acção dos agentes atmosféricos, que as dimensões após qualquer processo de crivagem se situem entre 10 e 20 cm e que não hajam fragmentos lamelares. Outras características de resistência mínimas, exigem que o material possua um peso volúmico superior a 22 kN/m^3 e que a resistência à carga pontual, após molhagem seja superior a $3,5 \text{ MPa}$. Os agregados reciclados de betão, após selecção na qual se retiram os fragmentos lamelares, estão em condições de substituir este material em zonas não sujeitas a ambientes agressivos, visto que, tal como o betão simples, pesam cerca de 24 kN/m^3 e são resistentes.



Fig.43 e 44 – Exemplo de aplicação de agregados reciclados em cestos de gabiões e na estabilização de taludes

Podem suscitar-se alguns receios relativos ao impacte visual quando os gabiões são preenchidos com material reciclado, em vez de material natural. Adicionalmente, podem colocar-se questões de durabilidade da solução com agregados reciclados, quando sujeitos à acção dos agentes atmosféricos. Para colmatar estes dois aspectos, à semelhança do que acontece nas escarpas do Douro, pode-se preencher a parte dos gabiões que fica exposta quer visualmente, quer à mercê dos agentes atmosféricos, com material natural, ficando o seu miolo composto totalmente por agregados reciclados. Esta possibilidade, apesar da construção de muros de gabiões ser uma necessidade

ocasional e desfasada no tempo, sem dúvida que consumirá grande quantidade de material reciclado de elevada granulometria, permitindo economizar nos processos de britagem e peneiração.

4.2.1.2. Aplicações em solos

Por vezes é necessário melhorar a qualidade dos solos para corresponderem às exigências das aplicações em construção civil, nomeadamente modificar as propriedades de deformabilidade, resistência ao corte e permeabilidade do solo. Uma das técnicas tradicionais utilizadas para o reforço de solos é a inclusão de materiais naturais, os quais se propõe substituir por fracção inerte reciclada.

4.2.1.3. Aplicações em edifícios

Os edifícios com caves, necessitam de um sistema para concretizar a drenagem inferior do pavimento enterrado e de drenos periféricos para evacuação das águas pluviais e/ou freáticas acumuladas. Nesse sentido, a solução corrente actualmente preconizada consiste na criação de drenos através do envolvimento de tubos perfurados com agregados grossos, envoltos com feltro geotêxtil. Também nesta solução, é empregue uma grande quantidade de material inerte, apenas com função de permitir a percolação das águas, através da sua granulometria de dreno e sem quaisquer requisitos. Será de salientar que se prevê que as águas pluviais serão tratadas a jusante em centrais de tratamento antes de serem libertadas nos cursos normais, evitando qualquer tipo de contaminação do meio de recepção. Outra função desempenhada por agregados grossos nas obras de construção de edifícios, é a de enchimento quer de fundações, quer de qualquer outro elemento que seja necessário. Visto que, com a peneiração dos agregados reciclados fragmentados é possível obter as granulometrias desejadas, sugere-se a substituição dos inertes naturais utilizados em edifícios, com funções de drenagem e de enchimento, como se pode observar nas figuras 45 e 46.



Fig.45 e 46 – Exemplos de aplicação de agregados reciclados na construção de edifícios [45]

Uma das técnicas tradicionais de construção de piscinas, consiste na escavação das terras e posterior recobrimento do fundo com brita. Seguidamente constroem-se as paredes da piscina. A camada de brita é então coberta com betão (figura 47), para dar forma ao fundo da piscina. Como a brita utilizada, tem apenas como função a regularização do terreno evitando o contacto directo do betão de fundo com o solo, propõe-se a sua substituição por agregados reciclados.



Fig.47 – Exemplos de aplicação de agregados reciclados na construção de bases de piscinas [46]

4.2.3. APLICAÇÕES EM AGREGADOS PARA BETÃO

Existem várias aplicações em que se pretende construir elementos em betão com uma dada forma específica, mas sem grandes necessidades de resistência. O betão, como material moldável por excelência, tem sido amplamente utilizado em várias dessas aplicações. Visto que, o que está em questão é primeiramente a forma a obter, sendo a resistência um requisito secundário, desde que o local não esteja sujeito a ambientes agressivos, um betão produzido com agregados reciclados pode perfeitamente substituir os betões convencionais. Neste ponto, salienta-se que, tanto podem ser usados betões com substituição da fracção inerte grossa, como da fracção fina.

4.2.3.1. Aplicações como agregados para betão simples em estradas, sem requisitos estruturais

Nas principais estradas, nas bases dos taludes de escavação, existem elementos de drenagem longitudinal designados por valetas que, quando executadas com fundo revestido, normalmente são materializadas em betão. Também nos taludes de aterro, quando estes são muito altos, por vezes colocam-se valas de bordadura, para evitar a erosão dos espaldares devida à acção erosiva das águas pluviais. Estes simples elementos com funções de drenagem, entre muitos outros, acompanham o desenvolvimento dos taludes ao longo da sua extensão e obrigam ao consumo de grandes quantidades de betão, podendo este ser perfeitamente substituído por betão reciclado. Da mesma forma, algumas estradas, possuem no seu contorno passeios para a circulação dos peões, que muitas vezes são realizados em betão simples (figura 47), o qual também poderá ser substituído por betão reciclado.



Fig.47 – Exemplo de aplicação de agregados reciclados na construção de passeios

4.2.3.2. Aplicações como agregados para betão simples em edifícios, sem requisitos estruturais

Nos edifícios correntes, existem duas aplicações para as quais se sugere a substituição por betão reciclado, nomeadamente, nos betões de limpeza e nos betões de enchimento de pavimentos. O betão de limpeza, utilizado para regularizar e evitar o contacto directo com o solo de fundação, apesar de não ser um consumo em massa de agregados reciclados, contribuirá em menor escala para a não utilização de inertes naturais.

O betão de enchimento, utilizado por vezes para albergar as instalações e tubagens de maior diâmetro, nomeadamente, os tubos de aspiração central, quando estas não são incluídas na laje resistente, apesar de possuírem uma pequena espessura, a sua área superficial é elevada exigindo grandes consumos de betão.

4.2.3.3. Aplicações como agregados para betão simples e armado

Como sobejamente referido em outros capítulos, a mais nobre e mais exigente aplicação dos agregados reciclados será em betão estrutural. Para isso deve ser garantida a qualidade dos agregados o mais a montante possível, ou seja, durante o processo de demolição, evitando a sua “contaminação” por elementos indesejáveis.

Na tentativa de salientar e chamar a atenção para as quantidades de agregados que são utilizados na construção na produção de betão e sobre as quais se debruça este trabalho, apresenta-se o quadro 13, onde estão indicadas as quantidades de betão pronto produzido em Portugal a partir do ano 2000 e até 2004, obtidas através do Instituto Nacional de Estatística. Tendo consciência de que o betão pronto é apenas uma parte do betão produzido em Portugal, devido à escassez de dados acessíveis representativos do consumo total anual de betão, é apenas feita referência a esta modalidade de produção de betão. Nesta estimativa grosseira, admitiu-se que a massa volúmica do betão simples é de 2400 kg/m³ e que o traço aproximado em peso é de 1:3:4:0,5 (cimento: areia: britas: água) para uma quantidade de cimento de 285 kg por cada m³ de betão produzido.

Quadro 13 – Quantidades de betão pronto e dos respectivos agregados [47]

Ano	Betão pronto (kg)	Agregado fino (ton)	Agregado grosso (ton)
2004	23.795.368.560	8.670.437	11.035.102
2003	23.638.285.488	8.613.200	10.962.255
2002	25.569.742.066	9.316.975	11.857.968
2001	25 658 037 788	9.349.148	11.898.915
2000	23.160.744.135	8.439.196	10.740.795

A análise do quadro anterior permite observar primeiramente a estagnação e crise que afectou o sector da construção em Portugal, reflectindo-se no decréscimo sucessivo da produção de betão pronto a partir do ano 2000. Para além disso, a análise do quadro permite concluir que, em média, resultante da produção anual de betão pronto, o consumo de agregado grosso ronda os 11 milhões de toneladas. À partida, o betão que abandona as centrais de betão pronto, tem como objectivo principal, desempenhar funções estruturais e como em Portugal as especificações LNEC permitem a incorporação de cerca de 20% e 25% em peso de agregados reciclados na produção de novos betões estruturais, não sujeitos a

ambientes agressivos, a ordem de grandeza do potencial de substituição em questão é de cerca de 2,5 milhões de toneladas por ano, abrindo-se aqui grandes possibilidades realistas de mercado para estes agregados.

Uma outra forma de interpretar os resultados, é através da comparação entre a produção anual de RCD's e o consumo anual de agregados na produção de betão pronto. Atendendo a que se estima que a produção anual de RCD's em Portugal seja cerca de $0,325 \times 10^6$ ton/hab, como referido no capítulo 2, admite-se que a produção total atinja o valor aproximado de $3,25 \times 10^6$ ton. Visto que é permitida a reincorporação de cerca de $2,5 \times 10^6$ ton de agregados reciclados, conclui-se que apenas na confecção de betão pronto, que constitui a produção indicada para betão estrutural reciclado, é possível escoar uma fracção considerável dos resíduos de betão, sendo o ganho ambiental resultante bastante elevado.

5

CONCLUSÃO

5.1. CONCLUSÕES GERAIS

Devido à quantidade que os RCD's actualmente representam, a realização deste trabalho permitiu observar que a sua produção pode ser avaliada sob várias perspectivas. As suas características e composição são bastante heterogéneas e variam de acordo com o tipo de obra e local de proveniência dos resíduos. Em obras de construção a sua composição depende dos novos materiais a empregar e em obras de demolição depende do tipo de materiais que constituíam o edifício original. De forma a privilegiar a sua recuperação valorizada, em ambas as situações se deve atender à separação responsável dos RCD's na origem. Em obras de construção este controlo é mais fácil e requer a existência de "ecopontos" para os diversos tipos de resíduos reaproveitáveis, que podem ser diferentes consoante as fases da obra. Em obras de demolição é bastante mais difícil garantir a homogeneidade dos resíduos, no entanto, a adopção de práticas de demolição do tipo selectivo permite evitar a presença de materiais que diminuam a qualidade dos resíduos ou a presença de contaminantes.

Em Portugal, surgiu recentemente o decreto-lei 46/2008, específico para os RCD's, que vem complementar o decreto-lei 178/2006, previamente existente e de carácter mais generalista. O novo decreto aponta no sentido do reaproveitamento dos resíduos e na prevenção da sua produção.

Os produtos resultantes dos processos de reciclagem de RCD's podem empregar-se em múltiplas aplicações, sendo que, uma das opções mais interessantes será a utilização como agregados reciclados. Actualmente, devido à capacidade tecnológica de produzir qualquer tipo de granulometria, são várias as aplicações dadas aos agregados derivados de RCD's em todo o mundo, sobretudo como bases e sub-bases de pavimentos de estradas, como material de enchimento e como material de drenagem. No entanto, a mais nobre aplicação será a sua reincorporação em novos betões. Neste trabalho, após análise de alguns casos de estudo referentes a este tema, verifica-se que é possível a sua utilização segura em betões estruturais (excepto o pré-esforçado), desde que as suas propriedades sejam controladas e a taxa de substituição da fracção natural seja baixa (entre 20% e 30%). Verifica-se que é viável substituir quer a fracção fina, quer a fracção grossa por material reciclado, no entanto, as propriedades dos agregados reciclados tendem a agravar-se com a diminuição da granulometria, exigindo maiores cuidados e um controlo mais apertado das propriedades dos betões reciclados. O controlo das propriedades dos agregados reciclados exige que a produção de betão estrutural se circunscreva à confecção de betão pronto, sujeito a monitorização e controlo de qualidade mais apertados. As maiores dificuldades que podem surgir na produção de betões reciclados prendem-se com o acerto das relações água/cimento devido à maior capacidade de absorção por parte dos agregados reciclados e do acréscimo da quantidade de cimento para atingir uma dada resistência, comparativamente com um betão normal. De forma a contornar a maior absorção de água por parte

dos agregados reciclados, aconselha-se o uso de adjuvantes redutores de água para se garantirem as condições de trabalhabilidade.

Em Portugal, as especificações existentes relativas à substituição da fracção inerte natural, apenas consideram a substituição da fracção grossa. No que concerne à aplicação dos agregados grossos reciclados em betões estruturais de ligantes hidráulicos, desde que não sujeitos a ambientes agressivos, a especificação LNEC E 471 limita os valores máximos a 20% e 25% de substituição em peso, de forma a não agravar as propriedades dos novos betões.

A realização deste trabalho tem como objectivo contribuir para a síntese e o aprofundamento do estado do conhecimento relativo às propriedades dos agregados reciclados, concluindo-se que a quantidade de argamassa aderente é a maior responsável pela alteração dos valores da densidade, da absorção de água, da perda por fragmentação de Los Angeles e do teor em sulfatos, comparativamente com os agregados naturais. Estas propriedades vão influenciar o desempenho e durabilidade dos betões reciclados, nomeadamente nos parâmetros relacionados com a resistência e deformabilidade, concluindo-se que as alterações induzidas são diferentes nos betões produzidos com incorporação de agregados finos ou com agregados grossos, separadamente. Propuseram-se várias aplicações viáveis para os agregados reciclados, visando o seu esgotamento na produção de novos betões e noutras possibilidades de menor nobreza. Espera-se que a realização deste trabalho tenha permitido esclarecer que a produção de betão com agregados reciclados é possível, com as devidas precauções técnicas e que será um passo em frente na construção, tendo em vista um desenvolvimento mais sustentável.

5.2. PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO

O presente trabalho não pretende responder a todas as questões existentes em relação ao desempenho de betões reciclados, principalmente na vertente da durabilidade.

São várias as áreas por explorar neste tema, até que seja uma realidade consolidada a incorporação de agregados reciclados na produção de novos betões, em Portugal. Enumeram-se de seguida, algumas das áreas que a curto prazo seria interessante desenvolver:

- devido ao carácter heterogéneo dos RCD's, surgem novos desafios no que concerne à sua caracterização experimental, nomeadamente através da alteração das especificações normativas existentes de forma a tornar os ensaios adaptáveis a este tipo de agregados;
- urge a criação de novos parâmetros de controlo relativos à quantidade de argamassa aderente e ao teor de contaminantes;
- determinação do tempo que os agregados reciclados necessitam para atingirem um teor de humidade próximo da saturação de forma a reduzir a sua capacidade absorvente aquando da mistura com os outros materiais da amassadura;
- determinação da viabilidade económica do produto reciclado resultante do processamento em centrais móveis e fixas de reciclagem;
- desenvolvimento e certificação, eventualmente normativa, dos processos de demolição selectiva, de forma a melhorar a qualidade dos resíduos de demolição;
- monitorização e avaliação do comportamento mecânico e dos parâmetros que mais afectam a durabilidade dos betões e das armaduras, ao longo do tempo.

Acredita-se que, no futuro, a maior consciência ambiental e um maior conhecimento vão justificar o surgimento de um novo mercado de comercialização para os agregados reciclados.

BIBLIOGRAFIA

- [1] www.ambienteonline.pt 2008.
- [2] Thomas, C. *Materiales ecologicos*. Construcción Sostenible, 4 de Abril de 2008, Santander.
- [3] Baum, H., Katz, A. *Amounts and composition of construction waste from residential buildings*. International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures (Vázquez, E.), 8-11 de Novembro de 2004, Barcelona, Espanha, pág. 201-207, RILEM Publications S.A.R.L., Barcelona.
- [4] Construction and demolition waste management practices and their economic impacts, Report to DGXI, European Commission, Fevereiro de 1999, Report by Symmond's, in association with ARGUS, COWI and PRC Bouwcentrum.
- [5] Bragança, L., Mateus, R. *Sustentabilidade de soluções construtivas*. 2º Congresso Construção sustentável, 27-28 Outubro de 2006, Leça da Palmeira.
- [6] Freire, L., Brito, J. *Custos e benefícios da demolição selectiva*. Construção 2001 (Fernando Branco, Jorge de Brito, M. Glória Gomes), 2001, Lisboa, Portugal, pág. 863-870, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [7] Brito, J., *Desconstrução – uma visão possível do futuro da construção*. Construção 2004 (Secção de Construções Civas), 2004, Porto, Portugal, Secção de Construções Civas do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [8] http://frd-abbruchtechnik.de/englisch/primary_crusher.htm. 2008.
- [9] http://www.apambiente.pt/portal/page?_pageid=73.1&_dad=portal&_schema=PORTAL. 2008.
- [10] Especificação LNEC E 471, Guia para a utilização de agregados reciclados grossos na produção de betões de ligantes hidráulicos, 2006, Portugal.
- [11] Gonçalves, A., Martins, I. *Guia para a utilização de materiais reciclados, Contribuição das novas especificações LNEC*. 2º Congresso Construção sustentável, 27-28 Outubro de 2006, Leça da Palmeira.
- [12] <http://www.appricod.org/spip/IMG/pdf/reagir.pdf> 2008.
- [13] Lauritzen, E. *Recycling of concrete - an overview of development and challenges*. International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures (Vázquez, E.), 8-11 de Novembro de 2004, Barcelona, Espanha, pág. 297-305, RILEM Publications S.A.R.L., Barcelona.
- [14] penhafidelis.blogspot.com/ 2008.
- [15] <http://www.igaot.pt/documentos/relatoriotematico/RT-ResiduosConstruDemolicao.pdf>. 2008.
- [16] http://www.cedr-a.gov.pt/residuos/Projecto%20Converter_Resialentejo.pdf 2008.
- [17] Hendricks, C., Xing, W. *Quality improvement of granular wastes by separation techniques*. International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures (Vázquez, E.), 8-11 de Novembro de 2004, Barcelona, Espanha, pág. 142-149, RILEM Publications S.A.R.L., Barcelona.
- [18] Larrañaga, M. *Experimental study on microstructure and structural behaviour of recycled aggregate concrete*. Dissertação de Doutoramento, Universidade Politécnica de Catalunha, 2004.

- [19] Hendricks, C., Xing, W. *Suitable separation treatment of stony components in construction and demolition waste*. International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures (Vázquez, E.), 8-11 de Novembro de 2004, Barcelona, Espanha, pág. 166-172, RILEM Publications S.A.R.L., Barcelona.
- [20] Weimann, K., Müller, A. *Properties of building materials gained from wet-processed crushed concrete fines*. International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures (Vázquez, E.), 8-11 de Novembro de 2004, Barcelona, Espanha, pág. 133-141, RILEM Publications S.A.R.L., Barcelona.
- [21] Juan, M., Guterriéz, P. *Influence of attached mortar content on the properties of recycled aggregate*. International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures (Vázquez, E.), 8-11 de Novembro de 2004, Barcelona, Espanha, pág. 536-544, RILEM Publications S.A.R.L., Barcelona.
- [22] Schouenborg, B., Aurstad, J., Pétursson, P. *Test methods adapted to alternative aggregates*. International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures (Vázquez, E.), 8-11 de Novembro de 2004, Barcelona, Espanha, pág. 173-180, RILEM Publications S.A.R.L., Barcelona.
- [23] Angulo, S., Ulsen, C., Carrijo, P., Silva, R., Jonh, V., Kahn, H. *Characterization of brazilian construction and demolition waste coarse recycled aggregate*. International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures (Vázquez, E.), 8-11 de Novembro de 2004, Barcelona, Espanha, pág. 87-96, RILEM Publications S.A.R.L., Barcelona.
- [24] Alaejos, P., Sánchez, M., Dapena, E., Vázquez, E., Barra, M., Etxeberria, M., Marí, A., Agullo, L., Martínez, F., Fonteboa, B., Polanco, A., Francisco, G., Aleza, F., Parra, J., Burón, M. *Draft of Spanish regulations for the use of recycled aggregate in the production of structural concrete*. International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures (Vázquez, E.), 8-11 de Novembro de 2004, Barcelona, Espanha, pág. 511-525, RILEM Publications S.A.R.L., Barcelona.
- [25] Guterriéz, P., Juan, M. *Utilization of recycled concrete aggregate for structural concrete*. International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures (Vázquez, E.), 8-11 de Novembro de 2004, Barcelona, Espanha, pág. 693-702, RILEM Publications S.A.R.L., Barcelona.
- [26] Evangelista, L., Brito, J. *Incorporação de agregados finos reciclados de betão na produção de novos betões*. Construção 2004 (Secção de Construções Cívicas), 2004, Porto, Portugal, pág. 333-338, Secção de Construções Cívicas do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [27] Khatib, J. *Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate*. 2003. www.sciencedirect.com. 2008.
- [28] Figueiredo, F., Sousa, H., Coutinho, J. *Propriedades de betões com agregados reciclados graníticos*. Construção 2004 (Secção de Construções Cívicas), 2004, Porto, Portugal, pág. 417-422, Secção de Construções Cívicas do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [29] Especificação LNEC E 373, Inertes para argamassas e betões. Características e verificação de conformidade, 1993, Portugal.
- [30] NP EN 12350-2, Ensaio do betão fresco -Parte 2: Ensaio de Abaixamento, 2002, Portugal.

- [31] NP EN 12350-6, Ensaios do betão fresco -Parte 6: Massa volúmica, 2002, Portugal.
- [32] NP EN 12390-3, Ensaios do betão endurecido -Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio, 2003, Portugal.
- [33] Especificação LNEC E 397, Betões -Determinação do módulo de elasticidade em compressão, 1993, Portugal.
- [34] NP EN 12390-6, Ensaios do betão endurecido -Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes, 2003, Portugal.
- [35] Especificação LNEC E 398, Betões: Determinação da retracção e expansão, 1993, Portugal.
- [36] Especificação LNEC E 394, Betões: Determinação da absorção de água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica, 1993, Portugal.
- [37] Especificação LNEC E 393, Betões: Determinação da absorção de água por capilaridade, 1993, Portugal.
- [38] Especificação LNEC E 391, Determinação da resistência à carbonatação, Portugal.
- [39] ASTM C1202, Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, 1997, American Society of Testing Materials, America.
- [40] Luping, T. *Chlorid transport – Measurement and prediction*. Dissertação de Doutoramento, Chalmers University of Technology, 1996.
- [41] Matias, D., Brito, J. *Incorporação de adjuvantes em betões produzidos com agregados grossos reciclados de betão*. Construção 2004 (Secção de Construções Civas), 2004, Porto, Portugal, pág. 339-344, Secção de Construções Civas do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [42] <http://www.trianovo.com/> 2008.
- [43] http://www.der.sp.gov.br/documentos/normas/normas_projetoH07.aspx .2008.
- [44] <http://www.ccd-r-a.gov.pt/residuos/070726-REAGIR-cmontemor.pdf> . 2008.
- [45] <http://www.ceifa-ambiente.net/> 2008.
- [46] http://www.construlink.com/dt_21_piscinas_2008_05_27.pdf 2008.
- [47] www.ine.pt/ . 2008.

**ANEXOS – CLASSIFICAÇÃO “LER” DOS RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

17 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (INCLUINDO SOLOS ESCAVADOS DE LOCAIS CONTAMINADOS):

17 01 Betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos:

17 01 01 Betão.

17 01 02 Tijolos.

17 01 03 Ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos.

17 01 06 (*) Misturas ou fracções separadas de betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos contendo substâncias perigosas.

17 01 07 Misturas de betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos não abrangidas em 170106.

17 02 Madeira, vidro e plástico:

17 02 01 Madeira.

17 02 02 Vidro.

17 02 03 Plástico.

17 02 04 (*) Vidro, plástico e madeira contendo ou contaminados com substâncias perigosas.

17 03 Misturas betuminosas, alcatrão e produtos de alcatrão:

17 03 01 (*) Misturas betuminosas contendo alcatrão.

17 03 02 Misturas betuminosas não abrangidas em 17 03 01.

17 03 03 (*) Alcatrão e produtos de alcatrão.

17 04 Metais (incluindo ligas):

17 04 01 Cobre, bronze e latão.

17 04 02 Alumínio.

17 04 03 Chumbo.

17 04 04 Zinco.

17 04 05 Ferro e aço.

17 04 06 Estanho.

17 04 07 Mistura de metais.

17 04 09 (*) Resíduos metálicos contaminados com substâncias perigosas.

17 04 10 (*) Cabos contendo hidrocarbonetos, alcatrão ou outras substâncias perigosas.

17 04 11 Cabos não abrangidos em 17 04 10.

17 05 Solos (incluindo solos escavados de locais contaminados), rochas e lamas de dragagem:

- 17 05 03 (*) Solos e rochas contendo substâncias perigosas.
- 17 05 04 Solos e rochas não abrangidos em 17 05 03.
- 17 05 05 (*) Lamas de dragagem contendo substâncias perigosas.
- 17 05 06 Lamas de dragagem não abrangidas em 17 05 05.
- 17 05 07 (*) Balastros de linhas de caminho de ferro contendo substâncias perigosas.
- 17 05 08 Balastros de linhas de caminho de ferro não abrangidos em 17 05 07.

17 06 Materiais de isolamento e materiais de construção contendo amianto:

- 17 06 01 (*) Materiais de isolamento contendo amianto.
- 17 06 03 (*) Outros materiais de isolamento contendo ou constituídos por substâncias perigosas.
- 17 06 04 Materiais de isolamento não abrangidos em 17 06 01 e 17 06 03.
- 17 06 05 (*) Materiais de construção contendo amianto.

17 08 Materiais de construção à base de gesso:

- 17 08 01 (*) Materiais de construção à base de gesso contaminados com substâncias perigosas.
- 17 08 02 Materiais de construção à base de gesso não abrangidos em 17 08 01.

17 09 Outros resíduos de construção e demolição:

- 17 09 01 (*) Resíduos de construção e demolição contendo mercúrio.
- 17 09 02 (*) Resíduos de construção e demolição contendo PCB (por exemplo, vedantes com PCB, revestimentos de piso à base de resinas com PCB, envidraçados vedados contendo PCB, condensadores com PCB).
- 17 09 03 (*) Outros resíduos de construção e demolição (incluindo misturas de resíduos) contendo substâncias perigosas.
- 17 09 04 Mistura de resíduos de construção e demolição não abrangidos em 17 09 01, 17 09 02 e 17 09 03.

